บทที่ 2

ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความนำ

ความจุของการจราจรที่ทางแยกเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการวางแผน ออกแบบ และการจัดการจราจร เนื่องจากเป็นดัชนีสำคัญในการบ่งบอกประสิทธิภาพของทางแยก ในด้านการออกแบบลักษณะทางกายภาพ ค่าความจุจะนำไปหาความกว้างและจำนวนช่องจราจรที่ต้องการ ส่วนในด้านการจัดการจราจร ก็จะนำไปประเมินความสามารถในการรองรับปริมาณจราจรภายใต้สภาพทางกายภาพและการควบคุมการจราจรที่มีอยู่ โดยทั่วไปปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความจุของการจราจร มีดังนี้

1. ลักษณะทางกายภาพของทางแยก ประกอบด้วย ความกว้างและจำนวนช่องทางจราจรในแต่ละทิศทาง ความลาดชันของทางแยก และลักษณะการใช้งานช่องทางจราจร (การอนุญาตให้มีการจอดรถบริเวณใกล้ทางแยก) เป็นต้น

2. คุณลักษณะของการจราจร ประกอบด้วย ปริมาณจราจรในแต่ละด้านของทางแยก การจัดช่องทางเดินรถในแต่ละทิศทาง (เลี้ยวซ้าย ไปตรง เลี้ยวขวา) รวมทั้งประเภทของยานพาหนะที่มีในแต่ละทิศทาง เป็นต้น

3. ลักษณะสัญญาณไฟจราจร ประกอบด้วย รูปแบบและจังหวะสัญญาณไฟจราจร เวลาของสัญญาณไฟเขียวในแต่ละทิศทาง และประเภทของสัญญาณไฟที่ควบคุมทางแยก เป็นต้น

ซึ่งผลกระทบโดยตรงที่มีต่อค่าความจุของการจราจรที่ทางแยก เนื่องจากลักษณะทางกายภาพและลักษณะของการจราจร สามารถทราบได้จากการศึกษาเกี่ยวกับอัตราการไหลอิ่มตัวของการจราจร

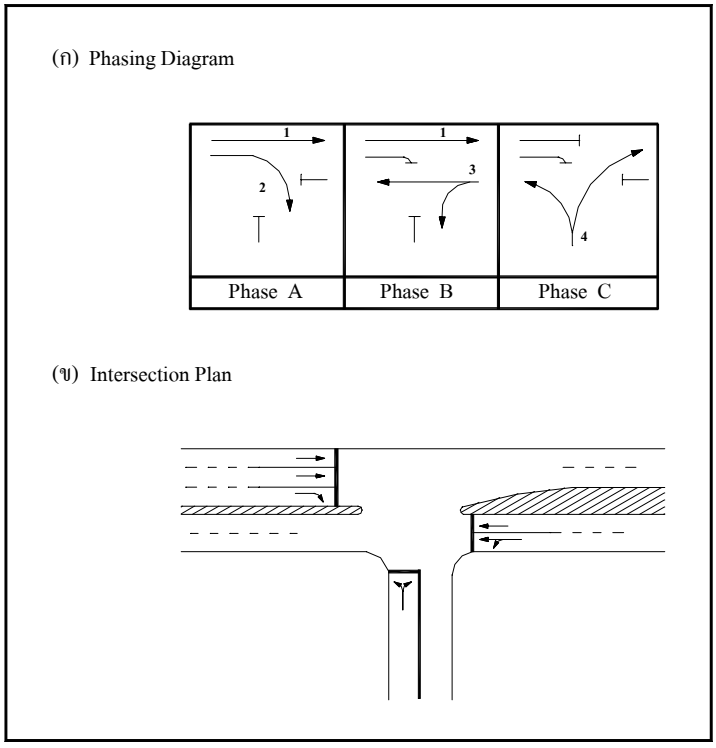
2.2 นิยามและคำจำกัดความเบื้องต้นสำหรับทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟ (กมล ปุ่นศิริ, 2542 อ้าง Akcelik, 1981)

การจัดจังหวะสัญญาณไฟ (Signal Phasing) เป็นวิธีการเบื้องต้นในการควบคุมการจราจรของทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟจราจร โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้การจราจรเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเกิดความปลอดภัย ถึงแม้ว่าในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีในการใช้สัญญาณไฟจราจรจะมีความยืดหยุ่นมากขึ้น แต่ก็เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ที่ทางเลือกสำหรับการใช้จังหวะ

สัญญาณไฟจะมีความซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้น จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องเข้าใจการเคลื่อนที่ของการจราจร (Traffic Movement) และจังหวะสัญญาณไฟว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร Akcelik (1981) ได้ให้คำจำกัดความเบื้องต้นสำหรับทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟไว้ ดังต่อไปนี้

2.2.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ (Movement)

แต่ละแถว/คิวของยานพาหนะที่แยกกันมุ่งหน้าเข้าสู่ทางแยก ซึ่งบ่งบอกลักษณะด้วยทิศทางการเคลื่อนที่ การใช้ช่องทางจราจร และข้อกำหนดในการใช้สิทธิในเขตทาง (Right of Way Provision) เรียกว่า การเคลื่อนที่ (Movement) การจัดสรรสิทธิในเขตทางให้กับแต่ละการเคลื่อนที่จะถูกกำหนดด้วยระบบการจัดจังหวะสัญญาณไฟ (Signal Phasing System) ภาพประกอบ 2.1 แสดงตัวอย่างการจัดจังหวะสัญญาณไฟสำหรับทางแยกรูปตัว T และลักษณะทางกายภาพของทางแยกที่แสดงการจัดช่องจราจร โดยแต่ละทิศทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะจะถูกกำหนดด้วยตัวเลขและจังหวะสัญญาณไฟจะถูกกำหนดด้วยตัวอักษร สำหรับการเคลื่อนที่ซึ่งได้รับสิทธิในเขตทาง (สัญญาณไฟเขียว) มากกว่าหนึ่งเฟส (Phase) จะเรียกว่า Overlap Movement เช่น การเคลื่อนที่ที่ 1 ในภาพประกอบ 2.1(ก) สำหรับการเคลื่อนที่อื่นๆ จะเป็น Non Overlap Movements



ภาพประกอบ 2.1 ตัวอย่างการจัดจังหวะสัญญาณไฟและทิศทางการเคลื่อนที่
ที่มา: Akcelik (1981)

2.2.2 จังหวะสัญญาณไฟ (Signal Phase)

จังหวะสัญญาณไฟเป็นรูปแบบของสัญญาณไฟจราจร โดยในระหว่างที่หนึ่งทิศทางการเคลื่อนที่ได้รับสิทธิในเขตทาง ณ จุดเริ่มต้นของเฟส จะต้องมีอย่างน้อยหนึ่งทิศทางการเคลื่อนที่ที่จะต้องสูญเสียสิทธิในเขตทาง ณ จุดสิ้นสุดของเฟส เมื่อทิศทางการเคลื่อนที่หนึ่งหยุดการเคลื่อนที่ และทิศทางการเคลื่อนที่อื่นๆ เริ่มต้นเคลื่อนที่จะเรียกว่า มีการเปลี่ยนเฟส (Phase Change) นั่นคือ มีการเปลี่ยนสิทธิในเขตทาง ระบบการจัดจังหวะสัญญาณไฟสามารถอธิบายได้ด้วยการใช้ Phase Movement Matrix ซึ่งแสดงการเริ่มต้นของเฟส (Starting Phases) และการสิ้นสุดของเฟส (Terminating Phases) ของแต่ละทิศทางการเคลื่อนที่ ดังตาราง 2.1

ตาราง 2.1 ระบบการจัดจังหวะสัญญาณไฟในแต่ละทิศทางการเคลื่อนที่ (Phase Movement Matrix)

ทิศทางการเคลื่อนที่	การเริ่มต้นของเฟส	การสิ้นสุดของเฟส
1	A	C
2	A	B
3	B	C
4	C	A

ที่มา: Akcelik (1981)

2.2.3 เวลาแสดงไฟเขียว (Displayed Green Time)

ช่วงระยะเวลาที่โคมไฟสัญญาณแสดงไฟเขียวแก่ผู้ใช้รถใช้ถนน เรียกว่า เวลาแสดงไฟเขียว *(G)*

2.2.4 เวลาระหว่างไฟเขียว (Intergreen Time)

ระยะเวลาจากจุดสิ้นสุดของช่วงเวลาไฟเขียว (Green Period) ของเฟสหนึ่ง จนถึงจุดเริ่มต้นของช่วงเวลาไฟเขียวของเฟสถัดไป เรียกว่า เวลาระหว่างไฟเขียว *(I)* ซึ่งจะประกอบด้วย ช่วงเวลาไฟเหลือง (Yellow Period) และช่วงเวลาไฟแดงทุกด้าน (All Red Period) ดังภาพประกอบ 2.2 โดยในระหว่างช่วงเวลาไฟแดงทุกด้าน ทั้งเฟสและทิศทางการเคลื่อนที่ที่สิ้นสุดและกำลังจะเริ่มต้นจะแสดงสัญญาณไฟแดงในเวลาเดียวกัน

2.2.5 เวลาเปลี่ยนเฟส (Phase Change Times)

จากภาพประกอบ 2.2 สามารถอธิบายได้ว่า เวลาของการเปลี่ยนเฟส *(F)* คือ เวลาของการสิ้นสุดของเฟส ซึ่งเกิดขึ้น ณ จุดสิ้นสุดของช่วงเวลาไฟเขียว ดังนั้น ช่วงเวลาไฟเขียวจึงเริ่มต้นที่เวลา $F + I$ ถ้าเวลาแสดงไฟเขียวสำหรับเฟส คือ G ช่วงเวลาไฟเขียวจะสิ้นสุดที่เวลา $F + I + G$ ซึ่งก็คือ เวลาของการเปลี่ยนเฟสสำหรับเฟสถัดไป โดยที่แผนภาพของรอบเวลาสัญญาณไฟจากภาพประกอบ 2.2 สามารถที่จะกำหนดให้เวลาของการเปลี่ยนเฟสแรกเป็นศูนย์ และเพิ่มค่าเวลา $I + G$ สำหรับเฟสแรก เพื่อที่จะหาเวลาของการเปลี่ยนเฟสสำหรับเฟสที่สองและเฟสต่อไป

2.2.6 รอบเวลาสัญญาณไฟ (Signal Cycle)

ลำดับของจังหวะสัญญาณไฟที่ครบถ้วนสมบูรณ์ในหนึ่งวงรอบ เรียกว่า รอบเวลาสัญญาณไฟ *(C)* หรืออีกนัยหนึ่ง คือ เวลาจากจุดเริ่มต้นของไฟเขียวของเฟสใดเฟสหนึ่งจนถึงจุดเริ่มต้นของเวลาไฟเขียวของเฟสเดียวกันดังภาพประกอบ 2.2 โดยที่ผลรวมของเวลาระหว่างไฟเขียวและเวลาแสดงไฟเขียวของทุกเฟส คือ รอบเวลาสัญญาณไฟ (Cycle Time) และสามารถคำนวณได้จากสมการ

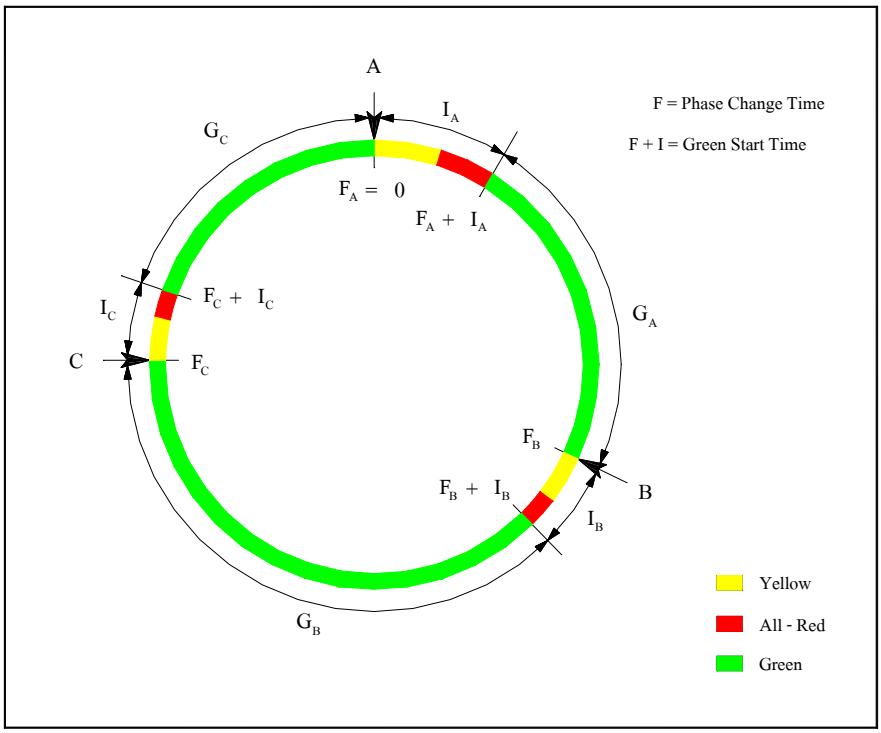
$$C = \sum (I + G) \qquad \text{.....(2.1)}$$

เมื่อ

C คือ รอบเวลาสัญญาณไฟ (วินาที)
I คือ เวลาระหว่างไฟเขียว (วินาที)
G คือ เวลาแสดงไฟเขียว (วินาที)

2.2.7 ลักษณะของการเคลื่อนที่ (Movement Characteristics)

ลักษณะของการเคลื่อนที่พื้นฐานดังภาพประกอบ 2.3 เป็นความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกับการจัดจังหวะสัญญาณไฟ โดยแบบจำลองพื้นฐานนี้มีลักษณะบางประการที่แตกต่างจากแบบจำลองที่ได้อธิบายไว้โดย Webster and Cobbe (1966) (ภาพประกอบ 2.4) ซึ่งรูปแบบใหม่ที่สำคัญของแบบจำลองนี้ คือ จะมีเวลาของการเปลี่ยนเฟส (F_i และ F_k) สำหรับเริ่มต้นและหยุดการเคลื่อนที่ที่พิจารณา ซึ่งไม่จำเป็นที่จะต้องสอดคล้องกับจังหวะสัญญาณไฟที่ต่อเนื่องกัน เพราะว่าการเคลื่อนที่นั้นอาจจะเป็น Overlap Movement



ภาพประกอบ 2.2 แผนภาพแสดงรอบเวลาสัญญาณไฟ
ที่มา: Akcelik (1981)

ก. ปริมาณการจราจรอิ่มตัวและเวลาไฟเขียวประสิทธิผล

แบบจำลองพื้นฐานในภาพประกอบ 2.3 จะสมมุติว่า เมื่อสัญญาณไฟเปลี่ยนเป็นไฟเขียว การไหล (Flow) ผ่านเส้นหยุด (Stop Line) ของปริมาณจราจรจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอัตราที่เรียกว่า ปริมาณการจราจรอิ่มตัว (Saturation Flow, *s*) ซึ่งจะอยู่ในระดับคงที่จนกระทั่งแถวคอยของยานพาหนะหมดไป ซึ่งเป็นช่วงเวลาสิ้นสุดไฟเขียว โดยที่อัตราการเคลื่อนที่ออกไปของแถวคอยของยานพาหนะจะต่ำในช่วง 2 - 3 วินาทีแรกของเวลาไฟเขียว ขณะที่ยานพาหนะเร่งความเร็วไปสู่ความเร็วปกติ (Normal Running Speed) ในทำนองเดียวกัน อัตราการเคลื่อนที่ออกไปจะต่ำลงในช่วงเวลาหลังจากสิ้นสุดไฟเขียว เพราะว่ายานพาหนะบางคันจะหยุด แต่ยานพาหนะคันอื่นอาจจะไม่หยุด ซึ่งช่วงเวลาไฟเขียวที่อิ่มตัวเต็มที่ (Fully Saturated Green Period) เป็นกรณีที่แถวคอยของยานพาหนะยังมีอยู่จนกระทั่งสิ้นสุดช่วงเวลาไฟเขียว ถ้าแทนที่เส้นโค้งการไหลออกไปของปริมาณจราจรที่แท้จริง (Actual Departure Flow Curve) ของแบบจำลองพื้นฐานด้วยรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีพื้นที่เท่ากันด้วยเส้นประ โดยที่ความสูงของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเท่ากับปริมาณการจราจรอิ่มตัว และความกว้างเท่ากับเวลาไฟเขียวประสิทธิผล (Effective Green Time, *g*) ดังนั้น พื้นที่ใต้เส้นโค้ง *(sg)* ก็คือ จำนวนยานพาหนะสูงสุดที่สามารถเคลื่อนที่ออกไปได้ในรอบเวลาสัญญาณ

ไฟ เวลาระหว่างจุดเริ่มต้นของช่วงเวลาไฟเขียวและช่วงเวลาไฟเขียวประสิทธิผล ก็คือ เวลาที่สูญเสียไปจากการออกรถ (Start Lost, *ee'*) ในทำนองเดียวกันเวลาระหว่างจุดสิ้นสุดของช่วงเวลาไฟเขียวและจุดสิ้นสุดของช่วงเวลาไฟเขียวประสิทธิผล ก็คือ เวลาเกี่ยวพันของไฟเหลือง (End Gain, *ff'*) ดังนั้น เวลาไฟเขียวประสิทธิผลจะสามารถคำนวณได้จาก สมการ

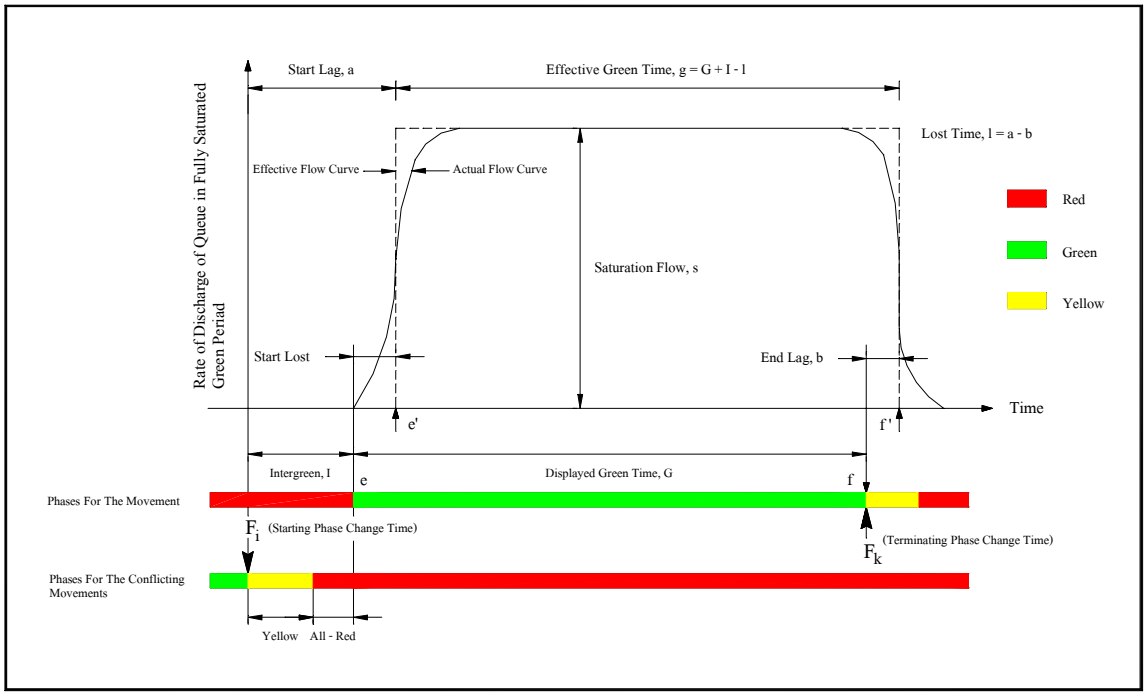
$$g = G + ff' - ee' \qquad \text{.....(2.2)}$$

เมื่อ

g คือ เวลาไฟเขียวประสิทธิผล (วินาที)
G คือ เวลาแสดงไฟเขียว (วินาที)
ff' คือ เวลาเกี่ยวพันของไฟเหลือง (วินาที)
ee' คือ เวลาที่สูญเสียไปจากการออกรถ (วินาที)

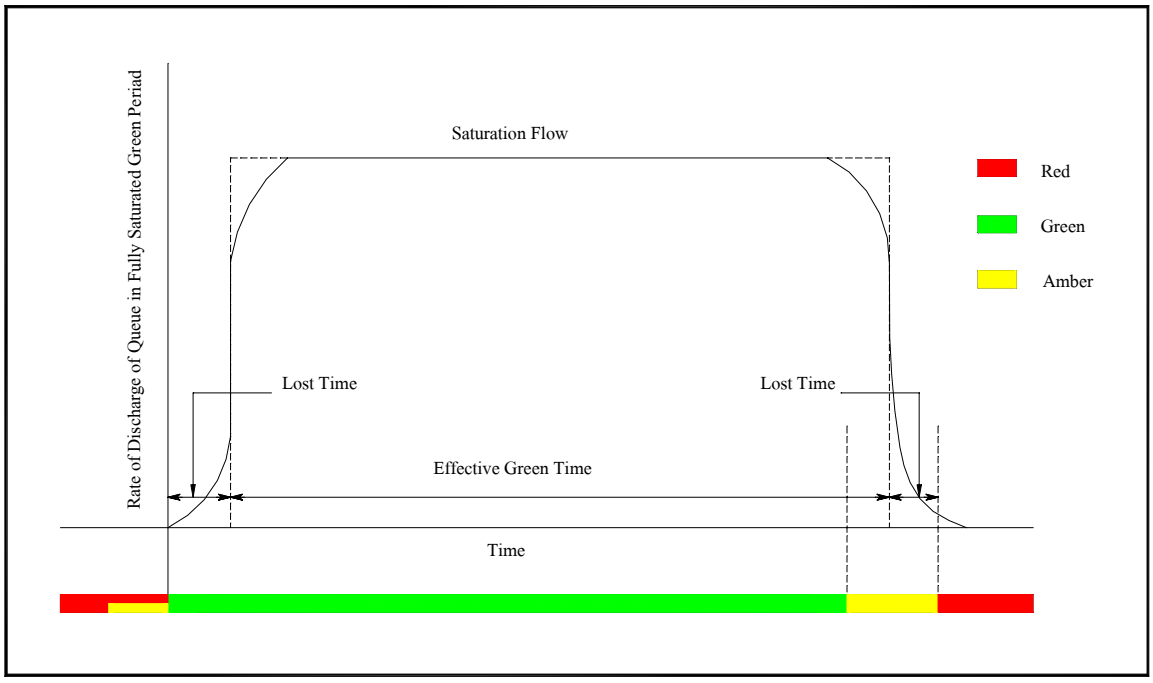
ข. เวลาล่าช้าของการเริ่มต้นและสิ้นสุด (Start and End Lag Times)

จากภาพประกอบ 2.3 เวลาล่าช้าของการเริ่มต้น *(a)* คือ ผลรวมของเวลาระหว่างไฟเขียวกับเวลาที่สูญเสียไปจากการออกรถและเวลาล่าช้าของการสิ้นสุด *(b)* คือ เวลาเกี่ยวพันของไฟเหลือง นั้นคือ $a = I + ee'$ และ $b = ff'$ โดยที่ช่วงเวลาไฟเขียวประสิทธิผลจะเริ่มต้นที่ $F_i + a$ และสิ้นสุดที่ $F_k + b$ เมื่อ F_i และ F_k เป็นเวลาของการเปลี่ยนเฟสสำหรับเริ่มต้นและหยุดการเคลื่อนที่ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้สามารถหาค่าเวลาเริ่มต้นและเวลาสิ้นสุดของช่วงเวลาแสดงไฟเขียวและเวลาไฟเขียวประสิทธิผลได้ ภาพประกอบ 2.5 เป็นแผนภาพแสดงเวลาที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงของระบบการจัดจังหวะสัญญาณไฟจากภาพประกอบ 2.2 โดยที่เส้นบนสุดจะแสดงเวลาของการเปลี่ยนเฟส *(F)* เวลาระหว่างไฟเขียว *(I)* และเวลาไฟเขียวของเฟส *(G)* สำหรับเส้นตรงอื่นๆ ถัดลงมาจะแสดงเวลาไฟเขียวประสิทธิผล *(g)* เวลาล่าช้าของการเริ่มต้น *(a)* และเวลาล่าช้าของการสิ้นสุด *(b)* ในแต่ละทิศทางการเคลื่อนที่



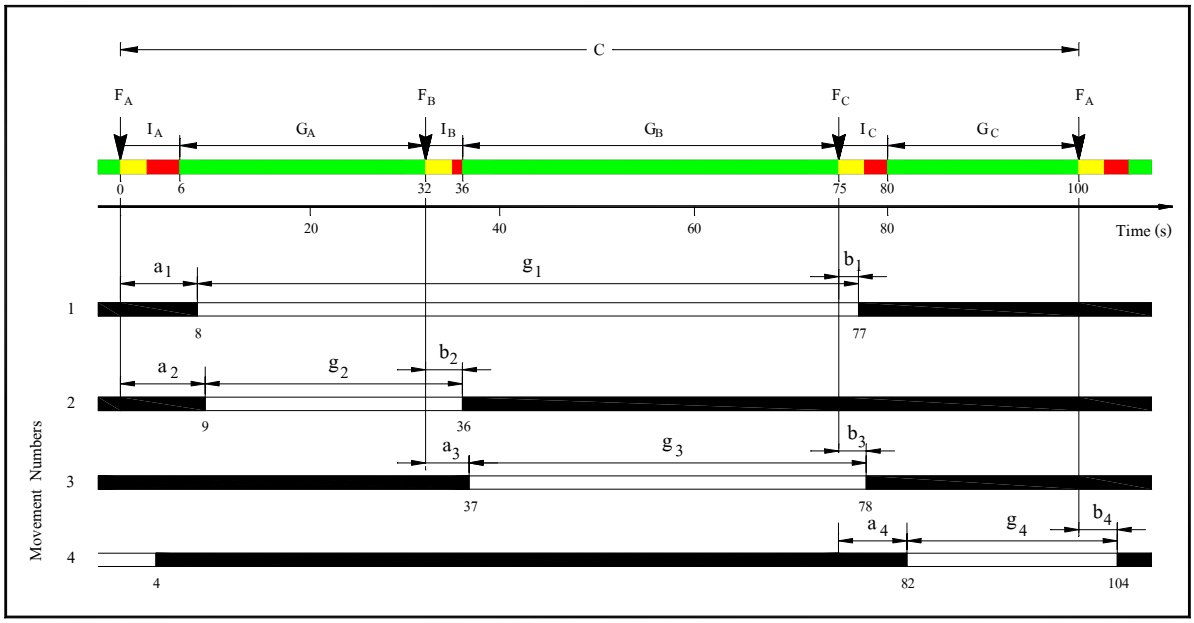
ภาพประกอบ 2.3 แบบจำลองปริมาณการจราจรอิ่มตัวและไฟเขียวประสิทธิผลของ Akcelik

ที่มา: Akcelik (1981)



ภาพประกอบ 2.4 แบบจำลองปริมาณการจราจรอิ่มตัวและไฟเขียวประสิทธิผลของ Webster

ที่มา: Webster and Cobbe (1966)



ภาพประกอบ 2.5 แผนภาพเวลาสัญญาณไฟ (Signal Timing Diagram)
ที่มา: Akcelik (1981)

ค. เวลาสูญเปล่าของการเคลื่อนที่ (Movement Lost Time)

เวลาสูญเปล่าของการเคลื่อนที่ (l) สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$l = a - b = I + ee' - ff' \qquad \text{.....(2.3)}$$

เมื่อ

l คือ เวลาสูญเปล่าของการเคลื่อนที่ (วินาที)
a คือ เวลาล่าช้าของการเริ่มต้น (วินาที)
b คือ เวลาล่าช้าของการสิ้นสุด (วินาที)

และถ้าสมมุติว่าเวลาสูญเสียจากการออกรถ *(ee')* เท่ากับเวลาเกี่ยวพันของไฟเหลือง *(ff')* ดังนั้น เวลาสูญเปล่าของการเคลื่อนที่ก็จะเท่ากับเวลาระหว่างไฟเขียว จากภาพประกอบ 2.3 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาแสดงไฟเขียว *(G)* และเวลาไฟเขียวประสิทธิผล *(g)* ได้ดังสมการ

$$g + l = G + I \qquad \text{.....(2.4)}$$

2.2.8 การเคลื่อนที่ที่วิกฤติ (Critical Movements)

การเคลื่อนที่ที่ใช้ในการหาค่าความจุของการจราจรและเวลาสัญญาณไฟ เรียกว่า การเคลื่อนที่ที่วิกฤติ โดยถ้าเวลาที่เพียงพอได้ถูกจัดสรรให้กับแต่ละการเคลื่อนที่ที่วิกฤติ เพื่อให้ได้ความจุของการจราจรที่ต้องการแล้ว การเคลื่อนที่ทั้งหมดก็จะมีความจุของการจราจรที่เพียงพอ ถ้าทุกๆ การเคลื่อนที่เป็น Non Overlap Movements ก็จะมีหนึ่งการเคลื่อนที่ที่วิกฤตต่อเฟส ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่ต้องการเวลายาวนานที่สุดในเฟส แต่ถ้ามีการเคลื่อนที่ที่เป็น Overlap Movements การหาการเคลื่อนที่ที่วิกฤติจะมีความยุ่งยากมากขึ้น อย่างไรก็ตามจะสามารถหาค่ารอบเวลาสัญญาณไฟที่ต้องการได้ ถ้าสามารถกำหนดได้ว่าการเคลื่อนที่ใดเป็นการเคลื่อนที่ที่วิกฤติ และคำนวณจากสมการ

$$C = \sum (g + l) \qquad \text{.....(2.5)}$$

เมื่อ

C คือ รอบเวลาสัญญาณไฟ (วินาที)

g คือ เวลาไฟเขียวประสิทธิผล สำหรับการเคลื่อนที่ที่วิกฤติ (วินาที)

l คือ เวลาที่สูญเสียไปของการเคลื่อนที่ สำหรับการเคลื่อนที่ที่วิกฤติ (วินาที)

2.2.9 เวลาสูญเปล่าของทางแยก (Intersection Lost Time)

เวลาสูญเปล่าของทางแยก *(L)* สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$L = \sum l \qquad \text{.....(2.6)}$$

เมื่อ

L คือ เวลาสูญเปล่าของทางแยก (วินาที)

l คือ เวลาที่สูญเสียไปของการเคลื่อนที่ สำหรับการเคลื่อนที่ที่วิกฤติ (วินาที)

2.3 ความจุของการจราจรที่ทางแยกสัญญาณไฟ (Signalized Intersection Capacity)

ความจุของการจราจรในแต่ละทิศทางการเคลื่อนที่ของทางแยก คือ อัตราสูงสุดที่ปริมาณจราจรในแต่ละทิศทางการเคลื่อนที่สามารถผ่านทางแยกไปได้ ภายใต้สภาวะที่เป็นอยู่ ซึ่งค่าความจุของการจราจรจะขึ้นอยู่กับเวลาสัญญาณไฟเขียว ดังสมการ

$$\text{Capacity } (c_i) = s_i \left(\frac{g_i}{C} \right) \qquad \text{.....(2.7)}$$

เมื่อ

c_i คือ ความจุในแต่ละทิศทางการเคลื่อนที่ที่จังหวะสัญญาณไฟ i (คัน/ชั่วโมง)

s_i คือ อัตราการไหลอิ่มตัวในแต่ละทิศทางการเคลื่อนที่ที่จังหวะสัญญาณไฟ i (คัน/ชั่วโมง)

g_i คือ เวลาไฟเขียวประสิทธิผลของทิศทางการเคลื่อนที่ (วินาที)

C คือ รอบเวลาสัญญาณไฟ (วินาที)

ถ้าจำนวนยานพาหนะที่ต้องการผ่านทางแยกในแต่ละทิศทางการเคลื่อนที่มีอัตรา q_i เพื่อให้การเคลื่อนที่ดังกล่าวมีความจุที่เพียงพอ ดังนั้น

$$s_i\left(\frac{g_i}{C}\right) \geq q_i \qquad \text{.....(2.8)}$$

นั่นคือ สัดส่วนของเวลาไฟเขียว ต้องเป็นดังนี้

$$\frac{g_i}{C} \geq \frac{q_i}{s_i} \qquad \text{.....(2.9)}$$

หรือ $u_i \geq y_i$

เมื่อ u_i คือ อัตราส่วนของเวลาสัญญาณไฟเขียวต่อรอบเวลาสัญญาณไฟของทิศทางการเคลื่อนที่ที่จังหวะสัญญาณไฟ i (Green Time Ratio)

y_i คือ อัตราส่วนของปริมาณจราจรที่ต้องการผ่านทางแยกต่ออัตราการไหลอิ่มตัวของทิศทางการเคลื่อนที่ที่จังหวะสัญญาณไฟ i (Flow Ratio)

และที่จังหวะสัญญาณไฟ i เมื่อมีทิศทางการเคลื่อนที่ 2 ทิศทางหรือมากกว่า ที่ใช้ช่วงเวลาไฟเขียวร่วมกัน ค่าของ $\frac{g_i}{C}$ จะต้องมีค่าอย่างต่ำเท่ากับค่า y_i สูงสุดของทิศทางการเคลื่อนที่เหล่านั้น

ความจุของทิศทางการเคลื่อนที่ใดๆ สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มสัดส่วนของเวลาสัญญาณไฟเขียว (u) ซึ่งความจุที่เพิ่มขึ้นในทิศทางนั้นจะมีผลทำให้ความจุของทิศทางการเคลื่อนที่อื่นๆ ลดลง โดยเงื่อนไขสำหรับความจุที่พอเพียงต่อความต้องการของทุกทิศทางการเคลื่อนที่เป็นไปตามสมการ

$$\sum_{i=1}^{n} y_i \leq \sum_{i=1}^{n} u_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{g_i}{C} = \frac{C-L}{C} \qquad \text{.....(2.10)}$$

เมื่อ

n คือ จำนวนจังหวะสัญญาณไฟจราจร

L คือ เวลาที่สูญเสียไปในหนึ่งรอบสัญญาณไฟจราจร (วินาที)

ผลจากสมการนี้ใช้ได้ทั้งสัญญาณไฟที่เป็นแบบช่วงเวลาคงที่ (Fixed Time) และแบบช่วงเวลาเปลี่ยนแปลงตามปริมาณการจราจร (Vehicle Actuated) โดยทิศทางการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการหาค่ารอบเวลาสัญญาณไฟเพื่อให้ได้ความจุที่เพียงพอของทางแยกต้องเป็นทิศทางการเคลื่อนที่ที่วิกฤติและเมื่อพิจารณาที่ทางแยก ซึ่งกำหนดให้

$U = \sum u_i$ คือ อัตราส่วนของช่วงเวลาไฟเขียวต่อรอบเวลาสัญญาณไฟของทางแยก (Intersection Green Time Ratio) ของการเคลื่อนที่ที่วิกฤติ และ

$Y = \sum y_i$ คือ อัตราส่วนของปริมาณจราจรที่ต้องการผ่านทางแยกต่ออัตราการไหลอิ่มตัวของทางแยก (Intersection Flow Ratio) ของการเคลื่อนที่ที่วิกฤติ

จากความสัมพันธ์ของค่าเวลาสูญเสีย (L) อัตราส่วนของช่วงเวลาไฟเขียว (U) และอัตราส่วนของปริมาณจราจร (Y) ของทางแยก ซึ่งเป็นผลรวมของตัวแปรจากการเคลื่อนที่ที่วิกฤติ ระดับความอิ่มตัวของการเคลื่อนที่ (Movement Degree of Saturation, x) คือ อัตราส่วนของปริมาณจราจรต่อความจุของการจราจร (Volume to Capacity Ratio) และระดับความอิ่มตัวของทางแยก (Intersection Degree of Saturation, X) ก็คือ ระดับความอิ่มตัวของการเคลื่อนที่ที่มีค่ามากที่สุด โดยระดับความอิ่มตัวของการเคลื่อนที่และของทางแยกสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$x = \frac{q_i}{c_i} = \frac{q_i C}{s_i g_i} = \frac{y_i}{u_i} \qquad \text{.....(2.11)}$$

$$X = \frac{Y}{U} = \frac{YC}{C - L} \qquad \text{.....(2.12)}$$

ในทางปฏิบัติ ระดับความอิ่มตัวสูงสุดจะต้องน้อยกว่า 1.0 ซึ่งเรียกว่า ระดับความอิ่มตัวใช้งาน (Practical Degree of Saturation) แทนด้วย x_p สำหรับระดับความอิ่มตัวของการเคลื่อนที่ และ X_p สำหรับระดับความอิ่มตัวของทางแยก ซึ่งจากการศึกษาค่าระดับความอิ่มตัวใช้งาน (x_p หรือ X_p) พบว่า ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.80 - 0.90 โดย Webster and Cobbe (1966) และ Akcelik (1981) ได้แนะนำให้ใช้ค่าดังกล่าวเท่ากับ 0.90

2.4 อัตราการไหลอิ่มตัวของการจราจรและรอบเวลาสัญญาณไฟที่เหมาะสม (Saturation Flow and Optimum Cycle Time)

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลอิ่มตัวกับรอบเวลาสัญญาณไฟ สามารถพิจารณาได้จากสมการสำหรับการคำนวณรอบเวลาสัญญาณไฟ ซึ่งมีค่าการไหลอิ่มตัวเป็นตัวแปรตัวหนึ่งในสูตร

Webster and Cobbe (1966) การออกแบบรอบเวลาสัญญาณไฟที่เหมาะสม ใช้สมมติฐานที่ว่าจะต้องเป็นรอบสัญญาณไฟที่ทำให้ค่าความล่าช้าของรถที่วิ่งผ่านทางแยกน้อยที่สุด ซึ่งในทางปฏิบัติรอบสัญญาณไฟควรมีค่าต่ำสุด 50 วินาที และมีค่าสูงสุดไม่เกิน 120 วินาที เนื่องจากการมีรอบสัญญาณไฟที่สั้นเกินไปจะทำให้เกิดความไม่ปลอดภัย และการมีรอบสัญญาณไฟที่ยาวเกินไปจะทำให้เกิดความล่าช้าของรถที่วิ่งเข้าสู่ทางแยกสูง การคำนวณหาค่ารอบสัญญาณไฟที่เหมาะสมใช้สูตรดังสมการ

$$C = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^{n} y_i} \qquad \text{.....(2.13)}$$

Miller (1968) ได้พัฒนาสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโดยประมาณของรอบเวลาสัญญาณไฟที่เหมาะสม ดังสมการ

$$C = \frac{L + 2.2\sqrt{L/s}}{1 - \sum_{i=1}^{n} y_i} \qquad \text{.....(2.14)}$$

Akcelik (1981) คำนวณหารอบสัญญาณไฟที่เหมาะสม โดยใช้สมมติฐานที่ว่าจะต้องเป็นรอบสัญญาณไฟที่ทำให้ค่าระดับความอิ่มตัวสูงสุด (Maximum Degree of Saturation) โดยมีสูตรการคำนวณ ดังสมการ

$$C = \frac{(1.4 + k)L + 6}{1 - \sum_{i=1}^{n} y_i} \qquad \text{.....(2.15)}$$

เมื่อ

C คือ รอบเวลาสัญญาณไฟที่เหมาะสม (วินาที)

L คือ เวลาที่สูญเสียทั้งหมดในหนึ่งรอบสัญญาณไฟจราจร (วินาที)

y_i คือ อัตราส่วนของปริมาณจราจรต่ออัตราการไหลอิ่มตัวของทิศทางการเคลื่อนที่ที่วิกฤติ ที่จังหวะสัญญาณไฟจราจร i

n คือ จำนวนจังหวะสัญญาณไฟ

s คือ อัตราการไหลอิ่มตัวในหน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคลต่อวินาที

k คือ ค่า Stop Penalty พารามิเตอร์ ซึ่งมีค่าดังนี้

$k = 0.4$ สำหรับความสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิงน้อยที่สุด

$k = 0.2$ สำหรับค่าใช้จ่ายของยานพาหนะและเวลาความล่าช้าที่น้อยที่สุด

$k = 0$ สำหรับความล่าช้าน้อยที่สุด

โดยเมื่อใช้ค่า $k = 0$ ผลลัพธ์ของรอบเวลาสัญญาณไฟที่ได้จากสมการที่ 2.15 จะมีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากสมการที่ 2.13

HCM (1994) คำนวณหาค่าโดยประมาณของรอบสัญญาณไฟ โดยใช้สมการ

$$C = \frac{LX_c}{X_c - \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{V}{s}\right)_i} \qquad \text{.....(2.16)}$$

เมื่อ

X_c คือ ค่าวิกฤติของค่าระดับความอิ่มตัวของทางแยก

$\left(\frac{V}{s}\right)_i$ คือ อัตราส่วนของปริมาณจราจรต่ออัตราการไหลอิ่มตัวของทิศทางการเคลื่อนที่ที่วิกฤติ ที่จังหวะสัญญาณไฟจราจร i

เมื่อทราบค่าประมาณของรอบสัญญาณไฟ ก็สามารถหาค่าช่วงเวลาไฟเขียวประสิทธิผลได้ดังสมการ

$$g_i = \frac{y_i}{\sum_{i=1}^{n} y_i}(C - L) \quad \text{(สำหรับวิธีของสมการที่ 2.13 – 2.15)} \qquad \text{.....(2.17)}$$

และ $$g_i = \left(\frac{V}{s}\right)_i\left(\frac{C}{X_i}\right) \quad \text{(สำหรับวิธีของสมการที่ 2.16)} \qquad \text{.....(2.18)}$$

เมื่อ

g_i คือ เวลาไฟเขียวประสิทธิผลที่จังหวะสัญญาณไฟจราจร i (วินาที)

X_i คือ ระดับความอิ่มตัวของทิศทางการเคลื่อนที่ที่วิกฤติ ที่จังหวะสัญญาณไฟจราจร i

2.5 การศึกษาอัตราการไหลอิ่มตัวของการจราจร (Saturation Flow)

การกล่าวถึงการศึกษาเกี่ยวกับอัตราการไหลอิ่มตัวในที่นี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นทฤษฎีและหลักการ และส่วนที่เป็นงานวิจัยซึ่งเกี่ยวข้องกับการศึกษาอัตราการไหลอิ่มตัว สำหรับเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัย ซึ่งประกอบด้วย

2.5.1 ทฤษฎีและหลักการ

2.5.1.1 การศึกษาอัตราการไหลอิ่มตัวโดย Webster and Cobbe

Webster and Cobbe (1966) ได้ทำการศึกษาการไหลอิ่มตัวในประทศอังกฤษอย่างลึกซึ้ง โดยจำลองสภาพทางเรขาคณิตและสภาวะของการจราจรที่ทางแยกร่วมกันอธิบายพฤติกรรมของการไหลอิ่มตัวได้ว่า เมื่อช่วงเวลาไฟเขียวเริ่มต้น ยานพาหนะจะใช้เวลาพอสมควรในการเริ่มต้นและเร่งความเร็วไปสู่ความเร็วปกติ (Normal Running Speed) แต่ว่าหลังจากนั้นเล็กน้อยแถวคอยของยานพาหนะก็จะถูกปล่อยออกไปด้วยอัตราที่ค่อนข้างคงที่ เรียกว่า ปริมาณการจราจรอิ่มตัว ดังภาพประกอบ 2.4 ซึ่งปริมาณการจราจรอิ่มตัวจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีแถวคอยของยานพาหนะอย่างต่อเนื่องและก่อให้เกิดการใช้ไฟเขียวอย่างสมบูรณ์ โดยปกติปริมาณการจราจรอิ่มตัวจะแสดงในหน่วยของรถยนต์นั่ง (Passenger Car Units, pcu) ต่อชั่วโมงของเวลาไฟเขียว โดยที่อัตราการไหลโดยเฉลี่ยจะต่ำในช่วง 2 – 3 วินาทีแรก ในขณะที่ยานพาหนะกำลังเร่งความเร็วไปสู่ความเร็วปกติ และในระหว่างช่วงเวลาไฟเหลือง (Yellow/Amber Period) ซึ่งยานพาหนะบางคันตัดสินใจที่จะหยุด แต่ยานพาหนะอื่นๆ อาจตัดสินใจที่จะขับข้ามทางแยก จึงเป็นการง่ายที่จะแทนที่ช่วงเวลาไฟเขียวและไฟเหลืองด้วยเวลาไฟเขียวประสิทธิผล (Effective Green Period) โดยสมมุติว่า การไหลอยู่ที่ระดับอิ่มตัวโดยตลอดช่วงเวลาไฟเขียวประสิทธิผล ซึ่งเป็นแนวคิดที่เป็นประโยชน์ เนื่องจากความจุก็เป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลาไฟเขียวประสิทธิผล ถ้าแทนที่พื้นที่ใต้โค้งด้วยรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีพื้นที่เท่ากัน โดยความสูงของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเท่ากับปริมาณการจราจรอิ่มตัวเฉลี่ย และความกว้างของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเท่ากับเวลาไฟเขียวประสิทธิผล ความแตกต่างระหว่างเวลาไฟเขียวประสิทธิผลกับผลรวมระหว่างเวลาไฟเขียวและไฟเหลือง ก็คือ เวลาสูญเสีย (Lost Time)

จากการศึกษานี้ ค่าของปริมาณการจราจรอิ่มตัวจะขึ้นอยู่กับสภาพที่เป็นอยู่ของทางเดินรถและลักษณะการจราจร ซึ่งองค์ประกอบด้านลักษณะทางกายภาพของทางแยกที่สำคัญ ได้แก่ ความกว้างของช่องจราจร ความกว้างของช่วงถนนในแต่ละด้าน (Approach Width) และความลาดชัน ส่วนองค์ประกอบด้านสภาวะการจราจรที่สำคัญ ได้แก่ ปริมาณของยานพาหนะชนิดต่างๆ (Traffic Composition) ปริมาณและลักษณะการเลี้ยวของยานพาหนะ ปริมาณยวดยานที่จอดบริเวณทางแยก และปริมาณการข้ามถนนของผู้ใช้ทาง เป็นต้น ปัจจัยหลักๆ ที่มีผลกระทบต่ออัตราการไหลอิ่มตัว มีดังนี้

1. ผลของความกว้างของช่วงถนน (Effect of Approach Width)

เมื่อไม่มีการจอดรถที่ทางแยกและไม่มียวดยานเลี้ยว ปริมาณจราจรที่การไหลอิ่มตัว ซึ่งมีหน่วยเป็นหน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคลต่อชั่วโมง จะมีค่าดังต่อไปนี้

ตาราง 2.2 อัตราการไหลอิ่มตัว (คันรถยนต์นั่งส่วนบุคคลต่อชั่วโมง) ตามความกว้างของช่วงถนน

ความกว้าง W_1 (ฟุต)	10	11	12	13	14	15	16	17
ความกว้าง W_2 (เมตร)	3.03	3.36	3.69	4.00	4.31	4.62	4.92	5.23
อัตราการไหลอิ่มตัว (S)	1,850	1,875	1,900	1,950	2,075	2,250	2,475	2,700

ที่มา : Webster and Cobbe (1966)

และในกรณีที่ความกว้างของช่วงถนนมีค่ามากกว่า 5.23 เมตร อัตราการไหลอิ่มตัวจะมีค่าแปรเปลี่ยนโดยตรงกับความกว้าง ดังสมการ (ภาพประกอบ 2.6)

$$S = 160\ W_1 \qquad (W_1 \text{ มีหน่วยเป็น ฟุต}) \qquad \text{.....(2.19)}$$

$$= 520\ W_2 \qquad (W_2 \text{ มีหน่วยเป็น เมตร}) \qquad \text{.....(2.20)}$$

2. ผลของความลาดชัน (Effect of Gradients)

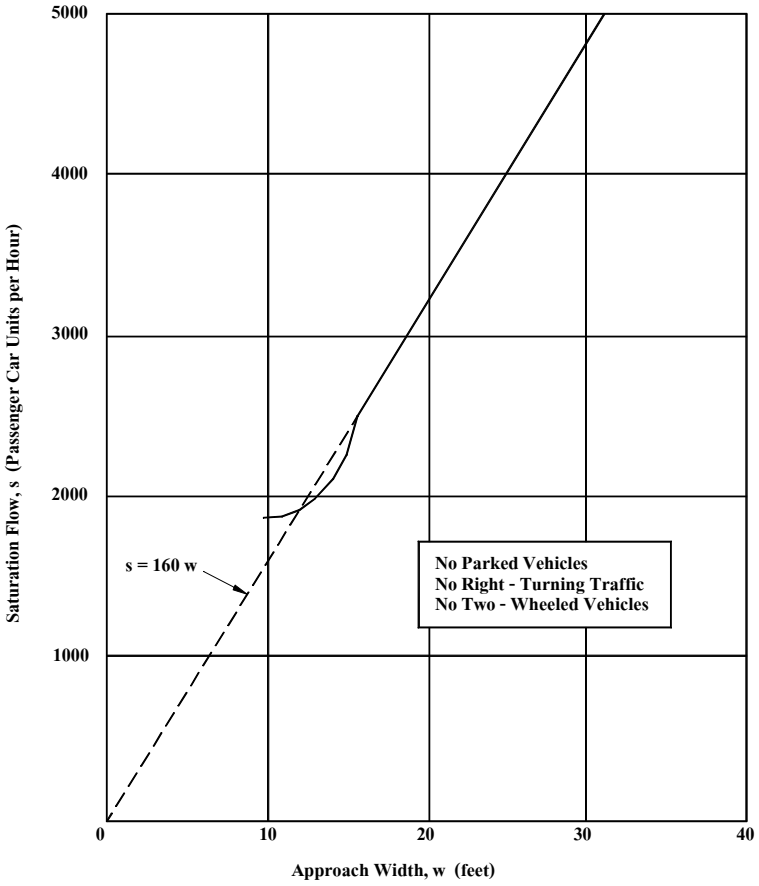
สำหรับความลาดชันของการขึ้นเขาทุกๆ ร้อยละ 1 (1% Uphill) อัตราการไหลอิ่มตัวจะลดลงร้อยละ 3 และสำหรับความลาดชันของการลงเขาทุกๆ ร้อยละ 1 (1% Downhill) อัตราการไหลอิ่มตัวจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 3 โดยค่าความลาดชันที่ได้เป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งวัดจากระยะ 200 ฟุต จากเส้น

หยุดของทางแยก โดยความลาดชันต้องไม่มากกว่า 10% สำหรับทางขึ้นเขา และต้องไม่มากกว่า 5% สำหรับทางลงเขา

3. ผลของยานพาหนะชนิดต่างๆ (Effect of Traffic Composition)

ผลของยานพาหนะชนิดต่างๆ ซึ่งเปลี่ยนค่าเป็นปริมาณจราจรในหน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคล (pcu) สำหรับการหาค่าอัตราการไหลอิ่มตัว มีค่าดังต่อไปนี้

1	รถบรรทุกขนาดใหญ่และขนาดกลาง	= 1.75 pcu
1	รถประจำทาง	= 2.25 pcu
1	รถบรรทุกขนาดเบา	= 1.00 pcu
1	รถจักรยานยนต์	= 0.33 pcu
1	รถจักรยาน	= 0.20 pcu



ภาพประกอบ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของช่วงถนนกับอัตราการไหลอิ่มตัว
ที่มา: Webster and Cobbe (1966)

4. ผลของปริมาณจราจรเลี้ยวขวา (Effect of Right – Turning Traffic)

ผลของปริมาณจราจรเลี้ยวขวา สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กรณี ดังนี้

ก. เมื่อไม่มีรถสวนและไม่มีช่องทางเฉพาะสำหรับรถเลี้ยวขวา โดยให้รถเลี้ยวและรถตรงเคลื่อนออกจากเส้นหยุดพร้อมๆ กัน ค่าปริมาณการไหลอิ่มตัวจะประมาณเท่ากับปริมาณการไหลอิ่มตัวสำหรับรถทางตรง

ข. เมื่อไม่มีรถสวนและมีช่องทางเฉพาะสำหรับรถเลี้ยวขวา พบว่า การไหลอิ่มตัวของรถเลี้ยวขวามีความสัมพันธ์กับค่ารัศมีของการเลี้ยว (ขึ้นอยู่กับรัศมีของทางแยก) ดังนี้

$$S = \frac{1800}{1+(5/r)} \quad \text{pcu/hr สำหรับ 1 ช่องทางเลี้ยวขวา} \quad \text{.....(2.21)}$$

$$S = \frac{3000}{1+(5/r)} \quad \text{pcu/hr สำหรับ 2 ช่องทางเลี้ยวขวา} \quad \text{.....(2.22)}$$

เมื่อ r คือ รัศมีของการเลี้ยวมีหน่วยเป็นฟุต

ค. เมื่อมีรถสวนและไม่มีช่องทางเฉพาะสำหรับรถเลี้ยวขวา ภายใต้สภาวะนี้การเลี้ยวขวาจะต้องหยุดรอที่เส้นหยุดหรือเลยเส้นไปเล็กน้อย ซึ่งทำให้รถทางตรงที่ต้องการไปต้องหยุดรอไปด้วย กรณีนี้จะทำให้รถทางตรงพยายามจะเบียดออกด้านซ้าย ดังนั้น ค่าปริมาณการไหลอิ่มตัวสามารถปรับค่าได้ โดยสมมุติให้รถเลี้ยวขวาแต่ละคันมีค่าเท่ากับ 1.75 ของรถตรง

และในกรณีที่การเลี้ยวของยานพาหนะยังค้างอยู่ที่ทางแยกเมื่อหมดสัญญาณไฟเขียว จะต้องใช้เวลาจำนวนหนึ่งที่จะขับออกจากทางแยก โดยผู้ที่ขับรถเลี้ยวขวาจะพยายามผ่านช่องว่างในทิศทางที่รถตรงข้ามสวนมา ซึ่งช่องว่างที่เหมาะสมสำหรับรถเลี้ยวขวา คือ 5 หรือ 6 วินาที

จากภาพประกอบ 2.7 ซึ่งแสดงผลการไหลอิ่มตัวของรถเลี้ยวขวาเมื่อมีรถสวนมา การเปลี่ยนค่าประสิทธิภาพการเลี้ยวขวาอิ่มตัว (S_r) เป็นจำนวนรถเลี้ยวขวาสูงสุดต่อรอบสัญญาณไฟ (N_r) สามารถทำได้โดยการใช้ประโยชน์ของช่องว่างระหว่างรถในทิศทางที่สวนมา ดังสมการ

$$N_r = S_r\left(\frac{gs - qc}{s - q}\right) \quad \text{.....(2.23)}$$

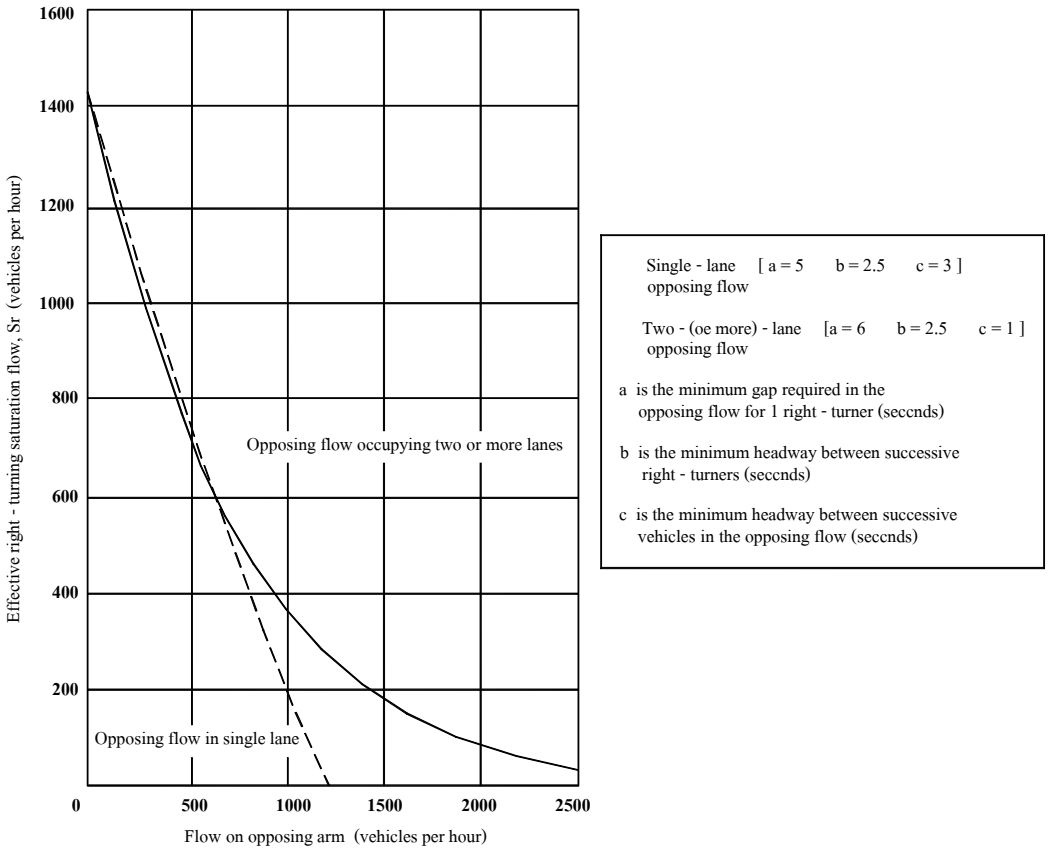
เมื่อ

N_r คือ จำนวนรถเลี้ยวขวาสูงสุดต่อรอบสัญญาณไฟ (คัน)

S_r คือ ประสิทธิภาพการเลี้ยวขวาอิ่มตัว (คัน/วินาที)

q คือ ปริมาณรถที่สวนมา (คัน/วินาที)
s คือ อัตราการไหลอิ่มตัวของรถที่สวนมา (คัน/วินาที)
g คือ เวลาไฟเขียว (วินาที)
c คือ รอบเวลาสัญญาณไฟ (วินาที)

ง. เมื่อมีรถสวนและมีช่องทางเฉพาะสำหรับรถเลี้ยวขวา กรณีนี้จะมีปัญหาเฉพาะกับรถที่สวนมาเท่านั้น ซึ่งสามารถคำนวณการไหลอิ่มตัวของรถเลี้ยวขวาได้ โดยการศึกษาช่วงเวลาระหว่างยานพาหนะของรถที่สวนมา (วัดระยะจากล้อหลังของรถคันหน้าถึงล้อหน้าของรถคันที่ตามมา, Gap) และระยะเวลาห่างระหว่างยานพาหนะของรถเลี้ยวขวา (วัดระยะจากล้อหลังของรถคันหน้าถึงล้อหลังของรถคันที่ตามมา, Headway) โดยที่รถเลี้ยวขวาจะสามารถเคลื่อนออกไปได้ทุกๆ ครั้งที่เกิดช่วงเวลาห่างระหว่างยานพาหนะเหมาะสม ซึ่งปกติจะประมาณ 5 - 6 วินาที เหมือนกับในกรณี ค



ภาพประกอบ 2.7 ประสิทธิภาพการเลี้ยวขวาอิ่มตัวเมื่อมีรถสวนมา
ที่มา: Webster and Cobbe (1966)

5. ผลของปริมาณจราจรเลี้ยวซ้าย (Effect of Left – Turning Traffic)

ในกรณีที่มีปริมาณจราจรเลี้ยวซ้ายมากกว่า 10% ของปริมาณจราจรทั้งหมด จะต้องมีการปรับค่าการไหลอิ่มตัวของรถเลี้ยวซ้ายให้มีค่าเท่ากับ 1.25 ของรถทางตรง แต่ถ้ามีปริมาณจราจรเลี้ยวซ้ายน้อยกว่า 10% ของปริมาณจราจรทั้งหมด ค่าการไหลอิ่มตัวของรถเลี้ยวซ้ายจะเท่ากับรถทางตรง

6. ผลของคนเดินข้ามถนน (Effect of Pedestrians)

ปกติไม่มีการปรับค่าการไหลอิ่มตัวเนื่องจากผลของคนเดินข้ามถนน นอกจากจะมีจำนวนมากจริงๆ หรือมีลักษณะพิเศษที่มีผลต่อการไหลอิ่มตัวเท่านั้น เช่น การมีจำนวนคนเดินข้ามถนนมาก จะมีผลต่อรถเลี้ยวซ้ายมากกว่ารถทางตรง ดังนั้น ต้องเพิ่มค่าการไหลอิ่มตัวสำหรับรถเลี้ยวซ้าย

7. ผลของการจอดรถที่ทางแยก (Effect of Parked Vehicles)

ผลเนื่องจากรถที่จอดบริเวณเส้นหยุดของทางแยกทำให้ค่าการไหลอิ่มตัวลดลง เนื่องจากรถที่จอดนั้นจะทำให้ความกว้างของทางเข้าทางแยกแคบลง โดยปริมาณการไหลอิ่มตัวจะลดลงเท่ากับการสูญเสียช่องทางเดินรถที่เส้นหยุด ซึ่งการสูญเสียนี้คำนวณได้จากสมการ

การสูญเสียความกว้างของช่องทางเดินรถ $= 5.5 - \frac{0.9(Z - 25)}{K}$ (ฟุต).....(2.24)

เมื่อ

Z คือ ระยะทางที่รถจอดห่างจากเส้นหยุด (ฟุต)

K คือ ช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียว (วินาที)

หากผลจากการคำนวณได้ค่าเป็นลบให้ถือว่าไม่มีการสูญเสียความกว้างของช่องทางเดินรถ และการสูญเสียความกว้างของช่องทางเดินรถจะเพิ่มขึ้นอีกประมาณร้อยละ 50 หากรถที่จอดเป็นรถบรรทุกหรือรถที่มีขนาดกว้าง โดยการจอดรถในระยะทางที่ใกล้กว่า 25 ฟุต ให้ถือว่าการสูญเสียช่องทางเดินรถเท่ากับขนาดความกว้างของยานพาหนะที่จอดเลย

8. ผลของคุณลักษณะทางกายภาพของทางแยก (Effect of Site Characteristic)

องค์ประกอบด้านคุณลักษณะทางกายภาพของทางแยกที่มีผลต่อการไหลอิ่มตัวแสดงไว้ดังตาราง 2.3 โดยที่ค่าการไหลอิ่มตัวมาตรฐานจัดอยู่ในกลุ่ม “ค่าเฉลี่ย”

ตาราง 2.3 ผลของคุณลักษณะทางกายภาพของทางแยกที่มีต่ออัตราการไหลอิ่มตัว

กลุ่มของทางแยก	รายละเอียดคุณลักษณะทางกายภาพ	ร้อยละของการไหลอิ่มตัวมาตรฐาน
ดี	ช่องทางจราจรมากกว่า 1 ช่อง ไม่มีผลกระทบต่อการไหลอิ่มตัวที่ชัดเจนเนื่องจากผลของคนเดินเท้า การจอดรถ และการเลี้ยวขวาของยานพาหนะ (ไม่ว่าจะเป็นเพราะไม่มีรถเลี้ยวขวา หรือมีช่องทางจัดไว้) มีการมองเห็นที่ดี มีรัศมีการเลี้ยวที่ดี และความกว้างของช่องจราจรเหมาะสมกับปริมาณการจราจร	120
เฉลี่ย	บริเวณทางแยกจัดอยู่ในกลุ่มค่าเฉลี่ย โดยมีรายละเอียดของลักษณะทางกายภาพผสมอยู่ในกลุ่มดีและกลุ่มเลว	100
เลว	ความเร็วเฉลี่ยต่ำ มีผลกระทบเนื่องจากการจอดรถ คนเดินถนน และการเลี้ยวขวาของยานพาหนะ มีการมองเห็นและการออกแบบทางแยกที่ไม่ดี เป็นถนนที่มีการจราจรสับสนเนื่องจากเป็นย่านการค้า	85

ที่มา: Webster and Cobbe (1966)

2.5.1.2 การศึกษาอัตราการไหลอิ่มตัวโดย Miller

Miller (1968) ตั้งสมมุติฐานและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษาคล้ายกับของ Webster และ Cobbe โดยมีข้อแตกต่างเพียง Miller พิจารณาค่าการไหลอิ่มตัวจากพฤติกรรมของค่าเฉลี่ยของระยะเวลาระหว่างยานพาหนะ (Average Headway) และแทนการไหลอิ่มตัวในหน่วยปริมาณรถยนต์นั่งส่วนบุคคลในทางตรง (Through Car Units – tcu) ต่อชั่วโมงของไฟเขียว โดยค่าปริมาณการไหลอิ่มตัวสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S = \frac{1}{\bar{h}} \qquad \text{.....(2.25)}$$

$$\bar{h} = \bar{h}_c\left(1 + P_{cv}\left(E_{cv} - 1\right) + P_{turn}\left(E_{turn} - 1\right)\right)$$

$$E_{cv} = 1 + \frac{\bar{e}_{cv}}{\bar{h}_c}$$

$$E_{turn} = 1 + \frac{\bar{e}_{turn}}{\bar{h}_c}$$

เมื่อ

$\bar{h}$ คือ ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาระหว่างยวดยาน (Average Headway) (วินาที/คัน)

$\bar{h}_c$ คือ ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาระหว่างรถยนต์นั่งส่วนบุคคลสำหรับรถทางตรง

P_{cv} คือ สัดส่วนของรถบรรทุก (Commercial Vehicle)

$\bar{e}_{cv}$ คือ ค่าเฉลี่ย “พิเศษ” ของระยะเวลาระหว่างยวดยานของรถบรรทุก

P_{turn} คือ สัดส่วนของรถเลี้ยว

$\bar{e}_{turn}$ คือ ค่าเฉลี่ย “พิเศษ” ของระยะเวลาระหว่างยวดยานของรถเลี้ยว

แบบจำลองนี้จะทำการแปลงประเภทของยานพาหนะแต่ละชนิด รวมไปถึงรถเลี้ยว ให้เป็นหน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคลทางตรง (Through Car Units) โดยอยู่ในรูปของหน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

ข้อแตกต่างจาก Webster อีกประการ คือ Miller ได้รวบรวมข้อมูลจากช่องทางจราจรของทางแยกต่างๆ ซึ่งมีความแตกต่างกันในด้านสภาวะแวดล้อม และวัดระยะเวลาระหว่างยานพาหนะ (Headway) ในแต่ละช่องทางจราจร ไม่ใช่ความกว้างของช่วงถนน ซึ่งทำให้การหาค่าอัตราการไหลอิ่มตัวของความกว้างของช่วงถนน จะได้จากผลรวมของค่าอัตราการไหลอิ่มตัวของแต่ละช่องจราจร โดย Miller ได้สร้างแบบจำลองลักษณะทางกายภาพ และสภาวะของการจราจรที่ทางแยกสำหรับอธิบายพฤติกรรมของการไหลอิ่มตัว ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญของลักษณะทางกายภาพและ

ลักษณะของการจราจร ได้แก่ ความกว้างของช่องทางจราจร ความลาดชัน ปริมาณจราจรเลี้ยวขวา และลักษณะของสภาพทางแยก ดังนี้

1. ผลของความกว้างของช่องทางจราจร (Effect of Lane Width)

เมื่อไม่มีการจอดรถที่ทางแยก ปริมาณการไหลอิ่มตัวสำหรับความกว้างของช่องทางจราจรที่อยู่นอกช่วง 10 – 12 ฟุต (3.05 - 3.66 เมตร) ต้องมีการปรับค่าดังตาราง 2.4 และถ้าหากความกว้างของช่วงถนนเปลี่ยนไป แต่ไม่ถึงขนาดที่จะต้องเพิ่มช่องจราจร จะใช้ความกว้างของช่วงถนนที่แคบที่สุดภายในระยะ 100 ฟุต จากเส้นหยุดของทางแยก เพื่อวัดความกว้างของช่องจราจรที่เปลี่ยนไปสำหรับใช้ในการปรับค่า

ตาราง 2.4 ค่าปรับแก้อัตราการไหลอิ่มตัวสำหรับผลของความกว้างช่องจราจร

ความกว้างของช่องทางจราจร (ฟุต)	8	9	10 - 12	13	14	15
ค่าปรับแก้ (%)	-12	-7	0	+3	+4.5	+6

ที่มา: Miller (1968)

2. ผลของความลาดชัน (Effect of Gradients)

ค่าการไหลอิ่มตัวลดลงร้อยละ 0.5 ต่อความลาดชันของการขึ้นเขาทุกๆ ร้อยละ 1 และค่าการไหลอิ่มตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.5 ต่อความลาดชันของการลงเขาทุกๆ ร้อยละ 1

3. ผลของปริมาณจราจรเลี้ยวขวา (Effect of Right – Turning Traffic)

ก. สำหรับรถเลี้ยวขวาและไม่มีรถสวน ใช้ค่าเทียบเท่าของรถเลี้ยวขวาเท่ากับรถทางตรง การเลี้ยวขวาขึ้นอยู่กับค่ารัศมีการเลี้ยวและความกว้างของช่องจราจรที่รถเลี้ยวขวา ซึ่งควรมีความกว้างน้อยที่สุดเท่ากับช่องจราจรในทางตรง

ข. สำหรับรถเลี้ยวขวาและมีรถสวน การหาค่าการไหลอิ่มตัวของรถเลี้ยวขวาจะอยู่ในรูปค่าเทียบเท่าของรถทางตรง ซึ่งค่าเทียบเท่ารถทางตรงสำหรับรถเลี้ยวขวาและมีรถสวน (E_{RT}) มีค่าดังสมการ

$$E_{RT} = \frac{1.5}{\left(f\left(\frac{sg - qC}{g(s-q)}\right) + \left(\frac{4.5}{g}\right)\right)} \qquad \text{.....(2.26)}$$

เมื่อ

q, s, g และ c เป็นตัวแปรของการจราจรในทิศทางตรงข้าม โดยที่

q และ s คือ ปริมาณจราจรและอัตราการไหลอิ่มตัวในทิศทางตรงข้าม (tcu/hr)

g และ C คือ ช่วงเวลาไฟเขียวประสิทธิผลและรอบสัญญาณไฟ (วินาที)

f คือ ฟังก์ชันของปริมาณจราจรที่สวนมา ดังตาราง 2.5

ตาราง 2.5 ค่า f ตามปริมาณจราจรที่สวนมา

q	0	200	400	600	800
f	1.00	0.81	0.65	0.54	0.45

ที่มา: Miller (1968)

ในการออกแบบงานที่เกี่ยวกับรถเลี้ยวขวาและมีรถสวน ต้องคำนวณค่าของ E_{RT} ซ้ำซ้อนหลายครั้ง แล้วใช้ค่าเฉลี่ย ซึ่งจากการศึกษาของ Miller ในรายงานนี้ คือ 2.9 (ดูตาราง 2.7)

4. ผลจากลักษณะทางกายภาพของทางแยก (Effect of Site Characteristic)

คุณลักษณะทางกายภาพที่มีผลต่อการไหลอิ่มตัวที่ทางแยกที่นำมาพิจารณาประกอบด้วย 4 ลักษณะ คือ บริเวณย่านธุรกิจ บริเวณย่านอุตสาหกรรม บริเวณย่านธุรกิจนอกตัวเมือง และบริเวณย่านที่พักอาศัย โดยลักษณะของช่องทางจราจรที่นำมาพิจารณาแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ เลี้ยวซ้าย ทางตรง และเลี้ยวขวา ดังตาราง 2.6

และตาราง 2.7 เป็นค่าพื้นฐานของหน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคลทางตรง (tcu) สำหรับยานพาหนะประเภทต่างๆ ในแต่ละลักษณะการเลี้ยว ซึ่งมีผลต่อการหาค่าอัตราการไหลอิ่มตัว โดยจากหลักการของ Miller ยานพาหนะที่มีเพลาเกิน 2 เพลา หรือมีล้อคู่ จะถูกกำหนดให้เป็นรถบรรทุก

ตาราง 2.6 อัตราการไหลอิ่มตัวในหน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคลทางตรงต่อชั่วโมง (tcu/hr) ตามชนิดของช่องทางจราจร และคุณลักษณะทางกายภาพของทางแยก

คุณลักษณะทางกายภาพ ตามสภาวะแวดล้อม	ชนิดของช่องทางจราจร		
	เลี้ยวซ้าย	ตรงไป	เลี้ยวขวา
บริเวณย่านธุรกิจกลางเมือง (CBD)	1,270	1,580	1,550
บริเวณย่านอุตสาหกรรม	1,570	1,700	1,670
บริเวณย่านธุรกิจนอกตัวเมือง	1,670	1,810	1,770
บริเวณย่านที่พักอาศัย	1,700	1,850	1,810

ที่มา: Miller (1968)

ตาราง 2.7 ค่าหน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคลทางตรง (tcu) ของยานพาหนะชนิดต่างๆ ในแต่ละลักษณะการเลี้ยว

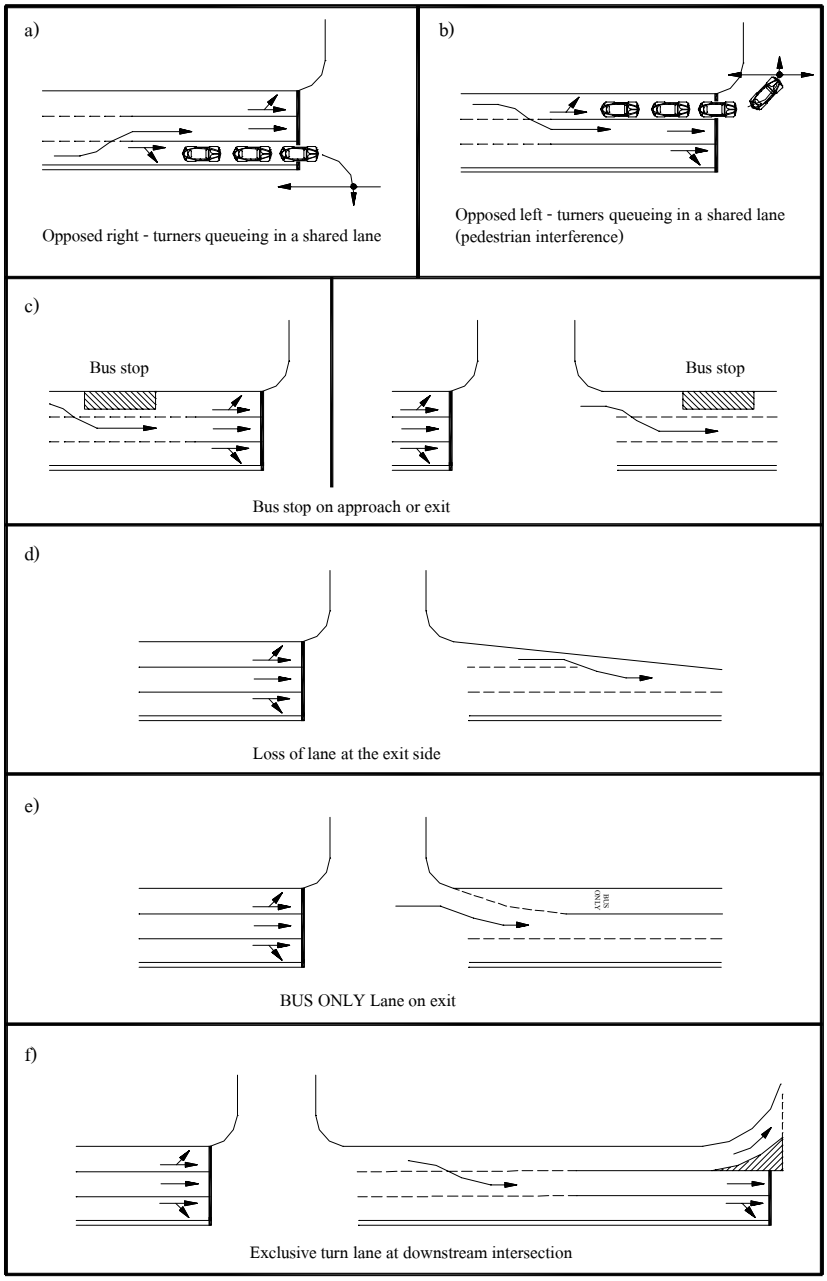
ลักษณะการเลี้ยว	หน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคลทางตรง	
	รถเก๋ง	รถบรรทุก
รถเลี้ยวซ้าย	1.25	2.5
รถทางตรง	1	2
รถเลี้ยวขวาไม่มีรถสวน	1	2
รถเลี้ยวขวามีรถสวน	2.9	3.9

ที่มา: Miller (1968)

2.5.1.3 การศึกษาอัตราการไหลอิ่มตัวโดย Akcelik (กมล ปุ่นศิริ, 2542 อ้าง Akcelik, 1981)

Akcelik (1981) สมมุติว่าเมื่อสัญญาณไฟจราจรเปลี่ยนเป็นไฟเขียว การเคลื่อนตัวของการจราจรผ่านเส้นหยุดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอัตราที่เรียกว่า ปริมาณการจราจรอิ่มตัว (Saturation Flow) ซึ่งจะยังคงที่อยู่จนกระทั่งแถวคอยของยานพาหนะสิ้นสุด หรือสิ้นสุดช่วงเวลาไฟเขียว จากภาพประกอบ 2.3 แบบจำลองพื้นฐานจะแทนที่เส้นโค้งของการเคลื่อนที่ออกไปของการจราจรที่แท้จริง (Actual Departure Flow Curve) ด้วยสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีพื้นที่เท่ากันด้วยเส้นประ ซึ่งความสูงจะเท่ากับปริมาณการจราจรอิ่มตัว และความกว้างจะเท่ากับเวลาไฟเขียวประสิทธิผล (Effective Green Time) ดังนั้น พื้นที่ใต้เส้นโค้ง ก็คือ ปริมาณการจราจรสูงสุดที่สามารถเคลื่อนตัวออกไปได้โดยเฉลี่ยในรอบเวลาสัญญาณไฟ โดยเวลาระหว่างไฟเขียว (Intergreen Time) คือ เวลาจากจุดสิ้นสุดของช่วงเวลาไฟเขียวของเฟสหนึ่งถึงจุดเริ่มต้นของช่วงเวลาไฟเขียวของเฟสถัดไป ซึ่งเท่ากับผลรวมของเวลาไฟเหลือง (Yellow/Amber Time) และเวลาไฟแดงทุกด้าน (All Red Time) ดังนั้น รอบเวลาสัญญาณไฟจราจร (Cycle Time) ก็คือ ผลรวมของเวลาระหว่างไฟเขียว และเวลาไฟเขียว (Green Time) ของทุกเฟส สำหรับเวลาล่าช้าของการเริ่มต้น (Start Lag Time) ก็คือ ผลรวมของเวลาระหว่างไฟเขียวและเวลาที่สูญเสียไปจากการออกรถ (Start Lost) และเวลาล่าช้าของการสิ้นสุด (End Lag Time) ก็คือ เวลาเกี่ยวพันของไฟเหลือง (End Gain) ค่าเวลาที่สูญเสีย (Lost Time) ของแต่ละการเคลื่อนที่ จะเท่ากับผลต่างระหว่างเวลาล่าช้าของการเริ่มต้นและเวลาล่าช้าของการสิ้นสุด โดยที่เวลาสูญเสียและเวลาระหว่างไฟเขียวของการเคลื่อนที่ จะมีความแตกต่างกันในแต่ละสถานที่ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปเวลาสูญเสียของการเคลื่อนที่สามารถที่จะสมมุติให้เท่ากับเวลาระหว่างไฟเขียวหรือเท่ากับเวลาระหว่างไฟเขียวบวกเพิ่ม 1 วินาที

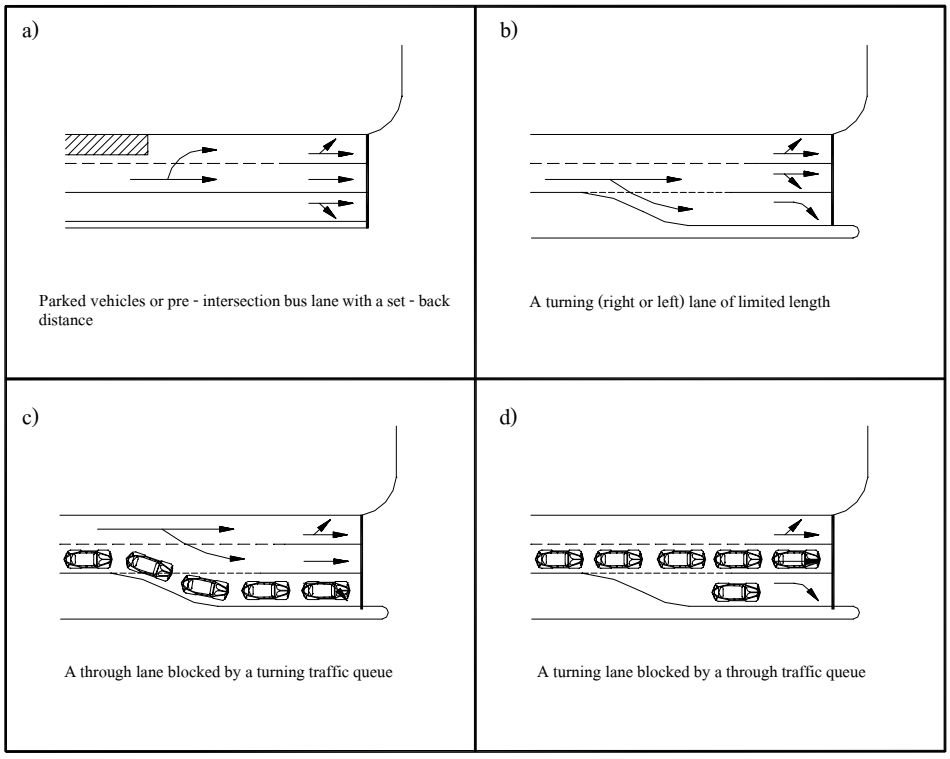
นอกจากนี้ Akcelik ยังกล่าวว่า **ปริมาณการจราจรอิ่มตัวเป็นตัวแปรตัวเดียวที่มีความสำคัญมากที่สุดในการวิเคราะห์ความจุและค่าเวลาของทางแยกที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟ** โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อปริมาณการจราจรอิ่มตัวประกอบด้วย สภาพแวดล้อม (Environment Class) ซึ่งอธิบายได้จากระดับของการแทรกแซง หรือการกีดขวางที่มีผลกระทบต่อการเคลื่อนที่อย่างอิสระของยาน-พาหนะ ความกว้างของช่องจราจร (Lane Width) ความลาดชัน (Gradient) และองค์ประกอบของการจราจร (Traffic Composition) นอกจากนี้ กรณีของช่องจราจรที่ต่ำกว่าระดับของการใช้ประโยชน์ (Lane Under - Utilization) (ภาพประกอบ 2.8) และกรณีของช่องจราจรที่มีความยาวจำกัด (Short Lane) หรือมีการจอดรถบริเวณด้านที่เข้าสู่ทางแยก (ภาพประกอบ 2.9) ก็มีอิทธิพลต่อค่าปริมาณการจราจรอิ่มตัวเช่นเดียวกัน



ภาพประกอบ 2.8 ลักษณะช่องทางจราจรที่ต่ำกว่าระดับของการใช้ประโยชน์
ที่มา: Akcelik (1981)

ปัจจัยเหล่านี้สามารถพิจารณาโดยการกำหนดประเภทของการเคลื่อนที่ (Description of Movements) จากด้านที่เข้าสู่ทางแยกอย่างเหมาะสม โดย Akcelik แนะนำให้คำนวณปริมาณการจราจรอิ่มตัวของแต่ละการเคลื่อนที่ ซึ่งวิธีการนี้แตกต่างจากวิธีการที่แสดงปริมาณการจราจรอิ่มตัวในลักษณะที่เป็นฟังก์ชั่นของความกว้างทั้งหมดของด้านที่เข้าสู่ทางแยก ที่อธิบายไว้โดย Webster and Cobbe (1966) จากการแสดงค่าปริมาณการจราจรอิ่มตัวบนพื้นฐานของแต่ละช่องจราจร (Lane

by Lane Basis) จะทำให้การจราจรจากแต่ละช่องจราจรสามารถที่จะพิจารณาโดยแยกกันหรือรวมเข้าด้วยกัน ดังนั้น การกำหนดประเภทของการเคลื่อนที่จึงเป็นพื้นฐานในการคำนวณค่าความจุและเวลาของสัญญาณไฟ โดยปริมาณการจราจรอิ่มตัวของการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับการกระจายของการจราจรระหว่างช่องจราจร ดังนั้น การตัดสินใจเกี่ยวกับการจัดสรรช่องจราจรสำหรับการเคลื่อนที่ต่างๆ (ช่องจราจรที่ใช้งานโดยเฉพาะ หรือช่องจราจรที่ใช้งานร่วมกัน) และการเลือกช่องจราจรของผู้ขับขี่ก็จะเป็นการกำหนดค่าปริมาณการจราจรอิ่มตัวภายใต้การจัดช่องจราจรดังกล่าว



ภาพประกอบ 2.9 ลักษณะของช่องจราจรที่มีความยาวจำกัด
ที่มา: Akcelik (1981)

สำหรับการประมาณค่าปริมาณการจราจรอิ่มตัว (Estimate of Saturation Flows) ตามวิธีที่อธิบายโดย Akcelik ในแต่ละช่องจราจรที่จัดสรรให้กับแต่ละการเคลื่อนที่ ต้องทำการหาค่าอัตราการไหลอิ่มตัวพื้นฐาน (Basic Saturation Flow: S_b) ซึ่งใช้ค่าสภาพแวดล้อมและประเภทของช่องจราจรประกอบการพิจารณาในหน่วยของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลทางตรงต่อชั่วโมง (Through Car Units per Hour, tcu/hr) ดังตาราง 2.8 ซึ่งเมื่อทราบค่าอัตราการไหลอิ่มตัวพื้นฐานแล้ว จะต้องทำการปรับแก้โดยใช้ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณการจราจรอิ่มตัว ได้แก่ ความกว้างของช่องจราจร ความลาดชันของถนน และลักษณะการเลี้ยวของยานพาหนะตามสมการที่ 2.27

ตาราง 2.8 อัตราการไหลอิ่มตัวพื้นฐานในหน่วย tcu/hr ในแต่ละกลุ่มสภาพแวดล้อมและรูปแบบของช่องจราจร

กลุ่มของสภาพแวดล้อม	รูปแบบของช่องจราจร		
	1	2	3
A	1,850	1,810	1,700
B	1,700	1,670	1,570
C	1,580	1,550	1,270

ที่มา: Akcelik (1981)

โดยที่ **กลุ่มของสภาพแวดล้อม**

กลุ่ม A แทนการเคลื่อนตัวของยานพาหนะเป็นไปได้อย่างอิสระ ลักษณะการมองเห็นดีและมีคนเดินข้ามถนนน้อยมาก

กลุ่ม B แทนสภาพทางแยกเหมาะสมพอสมควร มีการจอดรถบริเวณทางแยก และมีการกีดขวางของการจราจร เนื่องจากบริเวณนั้นเป็นพื้นที่ธุรกิจ

กลุ่ม C แทนสภาพทางแยกไม่ดี ลักษณะการมองเห็นไม่ดี มีคนเดินข้ามถนนจำนวนมาก มีการจอดรถมาก และเป็นเขตศูนย์กลางทางธุรกิจ (CBD)

และ **รูปแบบของช่องจราจร**

รูปแบบ 1 เป็นช่องจราจรสำหรับรถที่วิ่งตรงไปข้างหน้าเท่านั้น

รูปแบบ 2 เป็นช่องจราจรสำหรับรถเลี้ยว (เป็นช่องรอเลี้ยวซ้ายหรือช่องรอเลี้ยวขวา)

รูปแบบ 3 เป็นช่องจราจรรูปแบบเดียวกับรูปแบบที่ 2 แต่มีรัศมีการเลี้ยวต่ำ (น้อยกว่า 15 เมตร)

$$S = \left(\frac{f_w f_g}{f_c} \right) S_b \qquad \text{.....(2.27)}$$

เมื่อ

S คือ ค่าประมาณของอัตราการไหลอิ่มตัว (คัน/ชั่วโมง)

S_b คือ อัตราการไหลอิ่มตัวพื้นฐาน (tcu/hr)

f_w คือ ค่าปรับแก้สำหรับความกว้างของช่องจราจร

f_g คือ ค่าปรับแก้สำหรับความลาดชัน

f_c คือ ค่าปรับแก้สำหรับองค์ประกอบของการจราจร

1. ค่าปรับแก้สำหรับความกว้างของช่องจราจร

สามารถคำนวณค่าปรับแก้สำหรับความกว้างของช่องจราจรได้จากสมการ

$f_w = 1.0$ สำหรับความกว้างมีค่าอยู่ระหว่าง 3.0 – 3.7 เมตร (2.28)

$= 0.55+0.14w$ สำหรับความกว้างมีค่าอยู่ระหว่าง 2.4 – 3.0 เมตร

$= 0.83+0.05w$ สำหรับความกว้างมีค่าอยู่ระหว่าง 3.7 – 4.6 เมตร

เมื่อ

w คือ ความกว้างของช่องจราจร (เมตร)

สำหรับความกว้างของช่องจราจรที่มีความผันแปร ให้ใช้ความกว้างส่วนที่แคบที่สุดภายในระยะ 30 เมตร จากเส้นหยุด

2. ค่าปรับแก้สำหรับความลาดชัน

สามารถคำนวณค่าปรับแก้สำหรับความลาดชันของช่องจราจรได้จากสมการ

$$f_g = 1 \pm 0.5\left(\frac{G_r}{100}\right) \qquad \text{.....(2.29)}$$

เมื่อ

G_r คือ ร้อยละของความลาดชัน (ใช้ค่า + สำหรับทางลาดลงเขา และใช้ค่า - สำหรับทางลาดขึ้นเขา)

3. ค่าปรับแก้สำหรับองค์ประกอบของการจราจร

อิทธิพลเนื่องจากความแตกต่างของยานพาหนะและลักษณะการเลี้ยว แสดงในหน่วยของค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลทางตรง (Through Car Equivalents (e), tcu/veh) ดังตาราง 2.9 เพื่อปรับค่าอัตราการไหลอิ่มตัว และเปลี่ยนหน่วยจาก tcu เป็น veh/hr โดยสามารถคำนวณค่าปรับแก้สำหรับองค์ประกอบของการจราจรได้จากสมการ

$$f_c = \frac{\sum e_i q_i}{q} \qquad \text{.....(2.30)}$$

เมื่อ

q_i คือ ปริมาณของยานพาหนะแต่ละประเภทสำหรับลักษณะการเลี้ยวชนิด i

q คือ ปริมาณยานพาหนะทั้งหมด ($\sum q_i$)

e_i คือ ค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลทางตรงสำหรับแต่ละประเภทของยานพาหนะและลักษณะการเลี้ยวชนิด i (tcu/veh)

ตาราง 2.9 ค่า Through Car Equivalents (tcu/veh) สำหรับประเภทของยานพาหนะและลักษณะการเลี้ยวแต่ละชนิด

ประเภทยานพาหนะ	ทางตรง	การเลี้ยวไม่มีกระแสจราจรกีดขวาง		การเลี้ยวมีกระแสจราจรกีดขวาง
		ปกติ	มีข้อจำกัด	
รถยนต์นั่งส่วนบุคคล	1	1	1.25	e_0
ยานพาหนะขนาดใหญ่	2	2	2.5	e_0 +1

ที่มา: Akcelik (1981)

หมายเหตุ: ปกติ คือ การเลี้ยวซ้ายหรือเลี้ยวขวาของยานพาหนะ ซึ่งมีรัศมีการเลี้ยวอย่างน้อย 15 เมตร
มีข้อจำกัด คือ การเลี้ยวซ้ายหรือเลี้ยวขวาของยานพาหนะ ซึ่งมีรัศมีการเลี้ยวน้อยกว่า 15 เมตร
e_0 สำหรับวัตถุประสงค์ทั่วไปในการวิเคราะห์ค่าความจุ สามารถใช้ค่าเท่ากับ 3 เป็นค่าโดยประมาณ

2.5.1.4 การศึกษาอัตราการไหลอิ่มตัวโดย Transportation Research Board (TRB)

ในช่วงปี 1965-1966 หน่วยงาน Transportation Research Board (TRB) ของสหรัฐอเมริกาได้จัดพิมพ์หนังสือ “Highway Capacity Manual” (HCM) และอธิบายความหมายของความจุของการจราจรที่ทางแยกสัญญาณไฟ ซึ่งในระบบการจราจรของประเทศสหรัฐอเมริกาหมายถึง การไหลอิ่มตัว (Saturation Flow) ว่าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ เช่น การออกแบบทางเรขาคณิต (ความกว้างของด้านของทางแยก ชนิดของถนนเป็นแบบเดินรถทางเดียวหรือสองทาง และสภาวะการจอดรถบริเวณทางแยก) สภาพแวดล้อม (จำนวนประชากรและที่ตั้งของทางแยกในเขตเมือง) และคุณลักษณะของการจราจร (ลักษณะการเลี้ยว และชนิดของยานพาหนะ) จึงได้จัดทำตารางแสดงผลขององค์ประกอบต่างๆ ดังกล่าว ซึ่งอธิบายไว้ใน Highway Capacity Manual โดยค่าความจุของการจราจร (Capacity) มีหน่วยเป็นปริมาณการไหลของยานพาหนะต่อชั่วโมง และมีค่าเท่ากับ ค่าอัตราการไหลอิ่มตัวของการจราจรคูณด้วยสัดส่วนของ g/C โดยที่ g หมายถึง ช่วงเวลาสัญญาณไฟเขียว และ C หมายถึง รอบเวลาสัญญาณไฟ

การศึกษาอัตราการไหลอิ่มตัวโดยวิธีนี้ค่อนข้างมีผลในการนำไปใช้งานมาก เนื่องจากการศึกษาได้เก็บรวมรวมข้อมูลจำนวนมาก และได้จัดทำตารางแสดงผลขององค์ประกอบต่างๆ จากสถิติข้อมูลเหล่านั้น ซึ่งเหมาะสมกับสภาพภายในประเทศสหรัฐอเมริกาเท่านั้น

HCM (1994) ได้อธิบายเกี่ยวกับความจุของการจราจรไว้ว่า เป็นอัตราการไหลของปริมาณจราจรในหน่วยคันต่อชั่วโมงสำหรับแต่ละด้านที่เข้าสู่ทางแยก โดยสมมติว่า สัดส่วนของเวลาไฟ-เขียวต่อรอบสัญญาณไฟเป็น 1.0 ซึ่งในการคำนวณได้กำหนดค่าอัตราการไหลอิ่มตัวที่อุดมคติเป็น 1,900 คันรถยนต์นั่งส่วนบุคคลต่อชั่วโมงไฟเขียวต่อช่องจราจร (Passenger Car per Hour Green per Lane, pcphgpl) แล้วจึงใช้ค่าปรับแก้ในกรณีที่สภาพของการจราจรหรือสภาพทางเรขาคณิตไม่เป็นไปตามข้อกำหนดในอุดมคติ โดยค่าความจุและอัตราการไหลอิ่มตัวสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$c_i = s_i \times \left(\frac{g}{C}\right)_i \qquad \text{.....(2.31)}$$

$$s_i = s_0 N f_w f_{HV} f_g f_p f_{bb} f_a f_{RT} f_{LT} \qquad \text{.....(2.32)}$$

เมื่อ

c_i คือ ความจุของกลุ่มช่องจราจร หรือด้านของทางแยก i (คัน/ชั่วโมง)

s_i คือ อัตราการไหลอิ่มตัวของกลุ่มช่องจราจร หรือด้านของทางแยก i

$(g/C)_i$ คือ อัตราส่วนไฟเขียวต่อรอบสัญญาณไฟสำหรับกลุ่มช่องจราจร หรือด้านของทางแยก i

s_0 คือ อัตราการไหลอิ่มตัวอุดมคติ ปกติเท่ากับ 1,900 คันรถยนต์นั่งส่วนบุคคลต่อชั่วโมงไฟเขียวต่อช่องจราจร

N คือ จำนวนช่องจราจร

f_W คือ ค่าปรับแก้สำหรับความกว้างของช่องจราจร

f_{HV} คือ ค่าปรับแก้สำหรับรถบรรทุกหนักในกระแสจราจร

f_g คือ ค่าปรับแก้สำหรับความลาดเอียงเข้าสู่ทางแยก

f_p คือ ค่าปรับแก้สำหรับการมีช่องจราจรสำหรับจอดรถข้างๆ กลุ่มช่องจราจรนั้น และจำนวนการเข้ามาจอดต่อชั่วโมง

f_{bb} คือ ค่าปรับแก้สำหรับผลจากการกีดขวางของรถโดยสารประจำทาง

f_a คือ ค่าปรับแก้สำหรับลักษณะการใช้งานของพื้นที่

f_{RT} คือ ค่าปรับแก้สำหรับรถเลี้ยวขวา

f_{LT} คือ ค่าปรับแก้สำหรับรถเลี้ยวซ้าย

รายละเอียดของค่าปรับแก้ต่างๆ และวิธีการคำนวณสามารถดูได้จากคู่มือ HCM (1994)

2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อการวิจัยเพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัย พบว่า

Chang Chien (1978) ทำการศึกษาทางแยกสัญญาณไฟในเขตกรุงเทพฯ 9 ทางแยก จำนวน 17 ด้านของทางแยก พบว่า อัตราการไหลอิ่มตัวของการจราจรเฉลี่ยใน 1 ช่องจราจรของทิศทางตรง สำหรับช่วงความกว้างของช่องจราจร 2.80 - 3.50 เมตร มีค่า 1,980 ± 206 คันรถยนต์นั่งส่วนบุคคลต่อชั่วโมงเวลาไฟเขียว และอาศัยทฤษฎีสมการถดถอยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลอิ่มตัวกับความกว้างของช่องจราจรในทิศทางตรง ได้ผลลัพธ์ดังสมการ

อัตราการไหลอิ่มตัว = 643W (เฉพาะรถยนต์นั่งส่วนบุคคลในช่องทางตรง)

อัตราการไหลอิ่มตัว = 610W (รถทุกประเภทในช่องทางตรง)

เมื่อ

W คือ ความกว้างของช่องจราจร (เมตร)

และทำการหาค่าหน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคล และค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลทางตรงของรถเลี้ยวที่ไม่มีรถสวน ได้ผลลัพธ์ดังนี้

ค่าหน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคล: 1 รถบรรทุก = 1.65 pcu

1 รถสามล้อ = 0.71 pcu

1 รถจักรยานยนต์ = 0.24 pcu

ค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลทางตรงของรถเลี้ยวขวาและซ้าย:

1 รถบรรทุก = 1.85 pcu

1 รถสามล้อ = 0.80 pcu

1 รถจักรยานยนต์ = 0.27 pcu

ครรชิต ผิวนวล (2526) ทำการศึกษาความจุหรืออัตราการไหลอิ่มตัวของการจราจรที่ทางแยกสัญญาณไฟในเขตกรุงเทพฯ 8 ทางแยก จำนวน 23 ด้านของทางแยก พบว่า อัตราการไหลอิ่มตัวของการจราจรเฉลี่ยใน 1 ช่องจราจรในทิศทางตรง สำหรับช่วงความกว้างของช่องจราจร 2.50 - 3.50 เมตร มีค่า 1,950 ± 250 คันรถยนต์นั่งส่วนบุคคลต่อชั่วโมงเวลาไฟเขียว และอาศัยทฤษฎี

สมการถดถอยสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลอิ่มตัวในทิศทางตรงกับลักษณะทางกายภาพและคุณลักษณะของการจราจรที่ทางแยก ได้ผลลัพธ์ดังสมการ

อัตราการไหลอิ่มตัว = 795.56 + 415.71(var 20) + 12.71(var 24) + 9.76(var 25)

(สำหรับรถยนต์นั่งส่วนบุคคลในช่องทางตรง)

อัตราการไหลอิ่มตัว = 653.43 + 456.16(var 20) - 11.66(var 18) + 11.64(var 24) + 4.43(var 25)

(สำหรับรถทุกประเภทในช่องทางตรง)

เมื่อ

var 20 คือ ตัวแปรค่าความกว้างของช่องจราจร (เมตร)

var 24 คือ ตัวแปรว่ามีช่องทางเลี้ยวขวาหรือไม่ (ถ้ามี var 24 = 1 และไม่มี var 24 = 0)

var 25 คือ ตัวแปรว่ามีช่องทางเลี้ยวซ้ายหรือไม่ (ถ้ามี var 25 = 1 และไม่มี var 25 = 0)

var 18 คือ ตัวแปรค่าร้อยละของรถบรรทุกและรถเมล์ในปริมาณจราจร

ในการศึกษานี้ได้ทำการหาค่าหน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคล ค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลทางตรงของรถเลี้ยวที่ไม่มีรถสวน ซึ่งค่าที่ได้เท่ากับค่าจากการศึกษาของ Chang Chien (1978) และระยะเวลาสูญเสียในช่วงเริ่มต้นไฟเขียว ซึ่งเท่ากับ 1.91 วินาที

จาตุรนต์ ธนะสมบูรณ์ (2527) ศึกษาแบบจำลองการไหลอิ่มตัวของการจราจรที่ทางแยกสัญญาณไฟในเขตกรุงเทพฯ 12 ทางแยก จำนวน 22 ด้านของทางแยก และอาศัยทฤษฎีทางสถิติในการคำนวณหาตำแหน่งคันที่เท่าไรของรถยนต์ที่วิ่งออกจากทางแยกแล้วทำให้เกิดสภาวะการไหลอิ่มตัว โดยพบว่า สภาวะการไหลอิ่มตัวจะเกิดขึ้นหลังจากรถยนต์คันที่ 2 ในแถวคอยวิ่งผ่านเส้นหยุดไปแล้ว และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลอิ่มตัวกับความกว้างของช่องจราจร โดยอาศัยความสัมพันธ์ของค่าระยะเวลาห่างระหว่างรถยนต์ สำหรับช่องจราจรที่มีความกว้าง 2.70 - 3.10 เมตร ในหน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคลต่อชั่วโมงไฟเขียว ได้ผลลัพธ์ดังสมการ

อัตราการไหลอิ่มตัว = 660W (เฉพาะรถยนต์นั่งส่วนบุคคลในช่องทางตรง)

เมื่อ

W คือ ความกว้างของช่องจราจร (เมตร)

ในการศึกษาครั้งนี้ได้หาค่าหน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคลของรถแต่ละประเภท โดยมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการศึกษาของ ครรชิต ผิวนวล (2526) และระยะเวลาสูญเสียเริ่มต้นเมื่อเริ่มสัญญาณไฟเขียว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.35 วินาที

Tan (1990) ศึกษาอัตราการไหลอิ่มตัวของการจราจรที่ทางแยกสัญญาณไฟ 3 ทางแยก ในเขตกรุงเทพฯ จำนวน 3 ด้านของทางแยก และพิจารณาผลกระทบเนื่องจากรถบรรทุกในกระแสจราจร โดยทำการศึกษาอัตราการไหลอิ่มตัวจากการหาค่าเฉลี่ยของระยะเวลาห่างระหว่างรถยนต์นั่งส่วนบุคคลในช่องทางตรงของ 3 ทางแยก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.91, 1.86 และ 2.16 วินาที ตามลำดับ และศึกษาผลกระทบเนื่องจากรถบรรทุกที่มีต่ออัตราการไหลอิ่มตัว โดยการหาค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลของรถบรรทุกในทิศทางตรงและเลี้ยวขวาซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.53 และ 1.68 ตามลำดับ การศึกษานี้ไม่ได้พิจารณาผลกระทบเนื่องจากรถจักรยานยนต์ มีเพียงการศึกษาถึงผลกระทบระหว่างรถยนต์และรถบรรทุกเท่านั้น

Nguyen (1999) ทำการศึกษาผลกระทบที่มีต่ออัตราการไหลอิ่มตัวของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลเนื่องจากรถจักรยานยนต์ที่ทางแยกสัญญาณไฟ 2 ทางแยก ในประเทศเวียดนาม โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของรถจักรยานยนต์ในแถวคอยกับอัตราการไหลอิ่มตัวจากค่าระยะเวลาห่างระหว่างรถยนต์ พบว่า ระยะเวลาห่างระหว่างรถยนต์ 2 คันที่วิ่งตามกันมามีค่าอยู่ระหว่าง 2.06 - 3.40 วินาที ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของรถจักรยานยนต์ในช่องจราจร และระยะเวลาสูญเสียเริ่มต้นของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลสำหรับทุกตำแหน่งของรถจักรยานยนต์ในแถวคอยเท่ากับ 3.64 วินาที นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการไหลอิ่มตัวของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล ซึ่งไม่มีผลกระทบจากรถจักรยานยนต์มีค่าเท่ากับ 1,755 คันต่อชั่วโมงเวลาไฟเขียวต่อช่องจราจร อัตราการไหลอิ่มตัวของรถจักรยานยนต์ซึ่งไม่มีผลกระทบจากรถยนต์มีค่าเท่ากับ 7,970 คันรถจักรยานยนต์ต่อชั่วโมงเวลาไฟเขียวต่อช่องจราจร และจากค่าทั้งสองข้างต้น ทำให้ได้ค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลของรถจักรยานยนต์เท่ากับ 0.22

วิลาสินี ทวีเลิศ (2545) ศึกษาผลกระทบเนื่องจากรถจักรยานยนต์ที่มีต่ออัตราการไหลอิ่มตัวของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลในช่องทางตรงที่ทางแยกสัญญาณไฟในเขตกรุงเทพฯ จำนวน 2 ด้านของทางแยก ที่ค่าความกว้างของช่องจราจรค่าเดียว คือ 3.00 เมตร โดยอาศัยค่าระยะเวลาห่างระหว่างรถยนต์นั่งส่วนบุคคล พบว่า ช่วงที่เกิดการอิ่มตัวของระยะเวลาห่างระหว่างรถยนต์อยู่ในช่วงตั้งแต่รถยนต์คันที่ 4 - 10 ในแถวคอย และจำนวนรถจักรยานยนต์ตั้งแต่ 3 คันขึ้นไปในช่วง

ระหว่างรถยนต์คันที่ 4 - 10 ของแถวคอยมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลอิ่มตัวของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล โดยค่าเฉลี่ยของระยะเวลาห่างระหว่างรถยนต์ ในกรณีที่ไม่มีรถจักรยานยนต์และมีรถจักรยานยนต์จำนวน 1, 2, 3 และ 4 คันในช่วงรถยนต์คันที่ 4 - 10 ของแถวคอย มีค่าเท่ากับ 2.01, 2.02, 2.06, 2.14 และ 2.17 วินาที ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการไหลอิ่มตัวของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล ในกรณีที่ไม่มีรถจักรยานยนต์มาเกี่ยวข้องมีค่าเท่ากับ 1,810 คันต่อชั่วโมง ค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลของรถจักรยานยนต์มีค่าเป็น 0.22 และระยะเวลาสูญเสียเริ่มต้นของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลสำหรับกรณีที่ไม่มี และมีกลุ่มรถจักรยานยนต์อยู่ข้างหน้าแถวคอยของรถยนต์มีค่าเท่ากับ 2.91 และ 3.66 วินาที ตามลำดับ

สุนาริน จันทะ (2545) ศึกษาทางด้านสถิติของลักษณะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบริเวณทางแยกเมื่อได้รับสัญญาณไฟเขียว ที่ทางแยกสัญญาณไฟ 5 ทางแยก จำนวน 11 ด้านของทางแยกในแต่ละช่องทางจราจร โดยอาศัยค่าระยะเวลาห่างระหว่างรถยนต์ พบว่า ในช่วงเริ่มต้นไฟเขียว ช่วงเวลาห่างระหว่างรถคันแรกๆ มีค่าสูง และจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งเริ่มคงที่ ซึ่งอยู่ในช่วงตั้งแต่รถยนต์คันที่ 4 - 7 เป็นต้นไป โดยช่องทางตรงมีช่วงห่างระหว่างรถต่ำที่สุด (2.532 วินาที) รองลงมา ได้แก่ ช่องทางตรงร่วมกับเลี้ยวขวา (2.587 วินาที) ช่องทางเลี้ยวขวา (2.856 วินาที) ช่องทางเลี้ยวซ้าย (3.049 วินาที) และช่องทางตรงร่วมกับเลี้ยวซ้าย (3.248 วินาที)

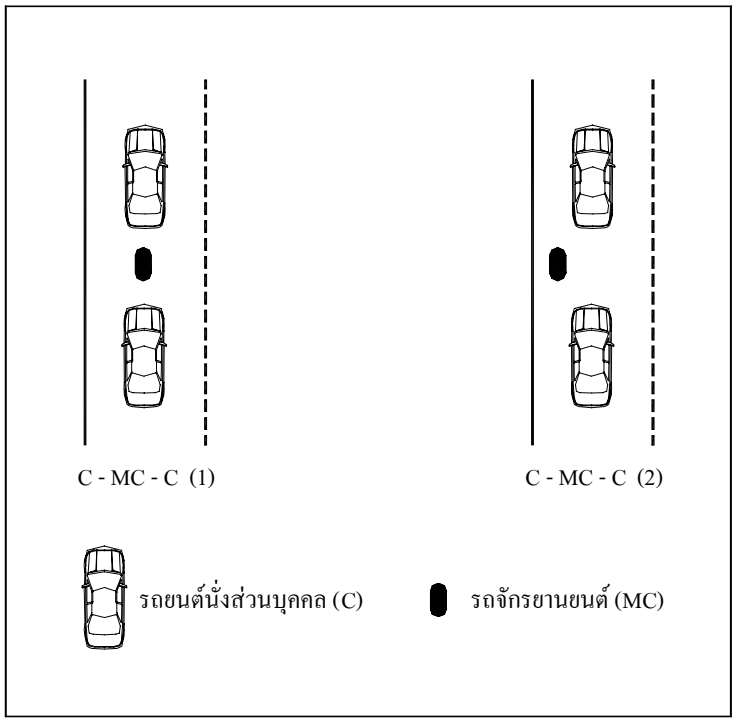
2.6 ผลกระทบของรถจักรยานยนต์ต่ออัตราการไหลอิ่มตัว

ปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่ออัตราการไหลแบบอิ่มตัวของการจราจร คือ องค์ประกอบของรถประเภทต่างๆ ในกระแสจราจร ดังนั้น จึงได้มีการกำหนดตัวคูณน้ำหนักเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลขึ้นมา เรียกว่า ค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคล ซึ่งค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลของรถจักรยานยนต์ก็เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ซึ่งมีผลกระทบต่อค่าอัตราการไหลอิ่มตัวเช่นกัน

จากการศึกษาของ Holroyd (1963) ซึ่งได้ศึกษาผลกระทบของรถจักรยานยนต์ในรูปของหน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคลสำหรับการหาค่าอัตราการไหลอิ่มตัว โดยแนะนำให้ใช้ค่าประมาณ 0.33 ของหน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคล และยังแสดงให้เห็นว่าค่าหน่วยรถยนต์นั่งส่วนบุคคลเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละพื้นที่ ซึ่งค่าที่เปลี่ยนแปลงไปดูเหมือนจะไม่เกี่ยวข้องกับช่วงความกว้างของถนน แต่เป็นผลเนื่องจากความผันแปรของสภาพที่ทางแยก ผลจากยานพาหนะชนิดต่างๆ และปริมาณของการเลี้ยว รวมทั้งความแตกต่างในด้านพฤติกรรมการขับขี่ในสถานที่ต่างๆ

จากการศึกษาที่ประเทศญี่ปุ่นในปี 1995 โดย Public Works Research Institute (PWRI) ที่ปรากฏใน Nguyen (1999) พบว่า ค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลของรถจักรยานยนต์ สำหรับ

กรณีที่รถจักรยานยนต์อยู่ในตำแหน่งระหว่างรถยนต์นั่งส่วนบุคคล 2 คัน (รถยนต์นั่งส่วนบุคคล – รถจักรยานยนต์ - รถยนต์นั่งส่วนบุคคล) ดังภาพประกอบ 2.10 มีค่าดังตาราง 2.10



ภาพประกอบ 2.10 ลักษณะตำแหน่งของรถจักรยานยนต์ ซึ่งอยู่ระหว่างรถยนต์ 2 คัน
ที่มา: PWRI (1995)

ตาราง 2.10 ค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลของรถจักรยานยนต์ในแต่ละกรณี

ความกว้างช่องจราจร	C-MC-C (1)	C-MC-C (2)	C-MC-C (1+2)
< 3.0 เมตร	0.87	0.55	0.83
3.0 – 4.0 เมตร	0.65	0.42	0.56
> 4.0 เมตร	0.70	0.26	0.44

ที่มา: PWRI (1995)

จากตาราง 2.10 สรุปได้ว่าค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลในกรณี C-MC-C (1) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.70 ส่วนกรณี C-M-C (2) เท่ากับ 0.40 และเฉลี่ยทั้งสองกรณีเท่ากับ 0.60 โดยที่ค่าเทียบเท่า

รถยนต์นั่งส่วนบุคคลของรถจักรยานยนต์จะขึ้นอยู่กับความกว้างของถนน กล่าวคือ ถ้าถนนแคบ ค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลของรถจักรยานยนต์จะมีค่ามากกว่าค่าของถนนกว้าง

และ **Masuda (1987)** ได้ทำการรวบรวมค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลของรถจักรยานยนต์ในประเทศต่างๆ ไว้ดังตาราง 2.11

ตาราง 2.11 ค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลของรถจักรยานยนต์ในประเทศต่างๆ

ประเทศ	ค่าเทียบเท่ารถยนต์นั่งส่วนบุคคลของรถจักรยานยนต์
ออสเตรเลีย	0.50
ฝรั่งเศส	0.30
เยอรมันตะวันตก	0.50
ญี่ปุ่น	0.33
ฮอลแลนด์	0.50
นอรเวย์	0.30 - 0.70
สวิสเซอร์แลนด์	0.50 - 1.00
สหราชอาณาจักร	0.33 - 1.00

ที่มา: Masuda (1987)

2.7 การวัดอัตราการไหลอิ่มตัวที่ทางแยก

Akcelik (1981) ได้แนะนำว่าเพื่อให้ได้ผลที่ดีที่สุด ค่าปริมาณการจราจรอิ่มตัว และระยะเวลาสูญเสียควรจะมีการวัดในสนามสำหรับการติดตั้งสัญญาณไฟจราจรใหม่ รวมทั้งในกรณีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเพื่อปรับปรุงทางแยกสัญญาณไฟที่มีอยู่เดิม เนื่องจากการเปลี่ยนไปของค่าปริมาณการจราจรอิ่มตัวมีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนไปของลักษณะทางเรขาคณิตของทางแยก การจัดสรรช่องจราจร และการจัดจังหวะสัญญาณไฟ ซึ่งข้อเสียที่สำคัญของการใช้วิธีการประมาณมากกว่าที่จะใช้วิธีการวัดในสนาม ก็คือ วิธีการประมาณจะอยู่บนพื้นฐานของค่าเฉลี่ยโดยทั่วไป ซึ่งอาจจะไม่ถูกต้องสำหรับบางกรณี ดังนั้น ถ้าเป็นไปได้ควรใช้วิธีวัดปริมาณการจราจรอิ่มตัวในสนาม

Transport and Road Research Laboratory (TRRL, 1963) ได้แนะนำวิธีการที่ใช้ในการวัดปริมาณการจราจรอิ่มตัว โดยหลักการของวิธีนี้ จะแบ่งส่วนที่เกิดการไหลอิ่มตัวของช่วงเวลาไฟ

เขียว (เวลาไฟเขียวรวมกับเวลาไฟเหลือง) เป็นช่วงเวลาสั้นๆ ประมาณ 0.10 นาที แล้วบันทึกจำนวนของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ออกจากแถวคอยในแต่ละช่วงที่ต่อเนื่องกันของเวลาไฟเขียว โดยในขณะที่วัดปริมาณการจราจรอิ่มตัวจะต้องนับปริมาณจราจรของยานพาหนะทุกประเภท โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อจะให้ปริมาณการจราจรอิ่มตัวที่แสดงในหน่วย คัน/ชั่วโมง สามารถที่จะเปลี่ยนให้อยู่ในหน่วยคันของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลต่อชั่วโมง (pcu/hr) เมื่อทราบค่าองค์ประกอบของการจราจร โดยความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและการไหลของการจราจรสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 2.11

ผลกระทบที่มีต่อการไหลของการจราจร เนื่องจากความล่าช้าจากการออกรถและช่วงเวลาไฟเหลือง สามารถที่จะอธิบายได้อย่างชัดเจนจากภาพประกอบ 2.11 ซึ่งระดับการไหลโดยเฉลี่ยในช่วงเวลาที่อิ่มตัวของช่วงเวลาไฟเขียว แต่ไม่รวมช่วงเวลาเริ่มต้นและช่วงเวลาที่สิ้นสุด ก็คือ ปริมาณการจราจรอิ่มตัว ซึ่งจากกราฟสามารถทำให้ง่ายขึ้น โดยการแทนที่ด้วยสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งแสดงด้วยเส้นประ ความสูงของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเท่ากับปริมาณการจราจรอิ่มตัว และพื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเท่ากับจำนวนของยานพาหนะทั้งหมดที่เคลื่อนที่ออกไปในช่วงเวลาไฟเขียวที่อิ่มตัวเต็มที่ (Fully Saturated Green Period) ความกว้างของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เรียกว่า เวลาไฟเขียวประสิทธิผล (Effective Green Time) และความแตกต่างระหว่างช่วงเวลาไฟเขียวที่แท้จริง (Actual Green Period) กับเวลาไฟเขียวประสิทธิผล คือ เวลาสูญเสียทั้งหมด (Total Lost Time) จากผลลัพธ์ของวิธีการนี้สามารถนำไปคำนวณรอบเวลาสัญญาณไฟที่เหมาะสมและความจุของการจราจร โดยค่าที่คำนวณได้จากหลักการของวิธีนี้สามารถแปลงค่าจากปริมาณการจราจรอิ่มตัวในหน่วย คัน/ชั่วโมง เป็น pcu/hr เมื่อทราบค่าองค์ประกอบของการจราจรในช่วงที่เกิดการไหลอิ่มตัว ซึ่งค่าแฟคเตอร์ดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$F = \left(\frac{n_1 + 1.75n_2 + 2.25n_3 + 2.5n_4 + 0.33n_5 + 0.2n_6}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4} \right) \left(1 + \frac{0.75n_7}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4} \right) \quad (2.33)$$

เมื่อ

n_1 คือ Flow of Private Cars Plus Light Commercial Vehicles

n_2 คือ Flow of Medium and Heavy Commercial Vehicles

n_3 คือ Flow of Buses

n_4 คือ Flow of Trams

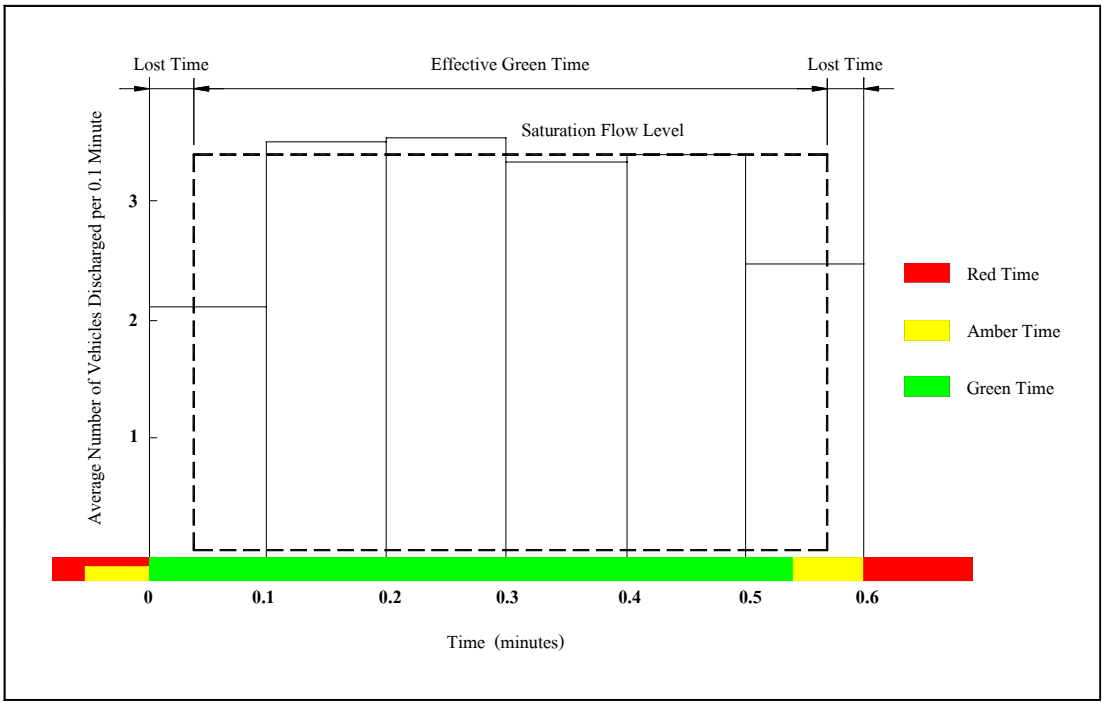
n_5 คือ Flow of Motorcycles

n_6 คือ Flow of Pedal Cycles

n_7 คือ Flow of Right Turners

และ TRRL (1963) ได้แนะนำค่าเทียบเท่าของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล (Passenger Car Equivalent, PCE) ดังนี้

1 รถยนต์นั่งส่วนบุคคล (Private Vehicle)	= 1.00	pcu
1 รถยนต์บรรทุกขนาดเล็ก (Light Commercial Vehicle)	= 1.00	pcu
1 รถยนต์บรรทุกขนาดใหญ่และขนาดกลาง (Heavy or Medium Commercial Vehicle)	= 1.75	pcu
1 รถบัส (Bus)	= 2.25	pcu
1 รถราง (Tram)	= 2.50	pcu
1 รถจักรยานยนต์ (Motorcycle)	= 0.33	pcu
1 รถจักรยาน (Pedal Cycle)	= 0.20	pcu
1 ยานพาหนะที่เลี้ยวขวา (Right -Turning Vehicle)	= 1.75	รถทางตรง



ภาพประกอบ 2.11 ลักษณะการวัดปริมาณการจราจรอิ่มตัว ตามวิธีของ TRRL
ที่มา: TRRL (1963)

จากนั้นสามารถคำนวณปริมาณการจราจรอิ่มตัวในหน่วย pcu/hr ได้โดยการคูณค่าปริมาณการจราจรอิ่มตัวในหน่วย คัน/ชั่วโมง ด้วยแฟคเตอร์องค์ประกอบของการจราจร *(F)* ซึ่งแฟคเตอร์นี้

จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นแฟคเตอร์ที่ใช้ในการปรับองค์ประกอบของการจราจร ส่วนที่สองเป็นแฟคเตอร์ที่ใช้ในการปรับยานพาหนะที่เลี้ยวขวา ซึ่งแฟคเตอร์ในส่วนนี้จะไม่ต้องใช้เมื่อการเลี้ยวขวาของยวดยานสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้โดยไม่มีการหยุดชะงัก (Uninterrupted Passage) เนื่องจากไม่มีกระแสจราจรที่กีดขวาง (Opposing Traffic Stream) หรือเป็นเพราะกระแสจราจรที่กีดขวางมีการควบคุมโดยระบบการจัดจังหวะสัญญาณไฟจราจร